



**Ana Carina da
Silva Verde**

**Caraterização da qualidade do ar recorrendo a
dados de satélite**



Ana Carina da Silva Verde Caracterização da qualidade do ar recorrendo a dados de satélite

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Doutora Oxana Anatolievna Tchepel, Professora auxiliar na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra e sob co-orientação da Doutora Joana Cardoso Ferreira, Estagiária de Pós-Doutoramento do Departamento de Ambiente e Ordenamento do Território da Universidade de Aveiro

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto CLICURB (EXCL/AAG-MAA/0383/2012), financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade (COMPETE) e por Fundos Nacionais através da FCT

Dedico este trabalho à minha sobrinha Mafalda.

“We the peoples of the world face a new responsibility for our global future. Through our economy and technology activity, we are now contributing to significant global changes on the Earth within the span of a few human generations. We have become part of the Earth System and one of the forces for Earth change.”

- NASA: Earth System Science, a Program for Global Change

O júri

Presidente

Professora Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda

Professora Catedrática, Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Vogais

Professor Doutor Nélson Augusto Cruz de Azevedo Barros

Professor Associado, Universidade Fernando Pessoa

Professora Doutora Oxana Anatolievna Tchepel

Professora Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra

Agradecimentos

Muitas seriam as pessoas que mereceriam uma palavra de apreço pelo apoio e pela força de acreditar de que, e apesar de todas as adversidades, este projeto seria concluído. Àqueles que me inspiraram e motivaram e que de uma forma sutil e indelével contribuíram para o resultado final desta dissertação, o meu muito obrigada.

Gostaria de agradecer à Doutora Oxana Techepele e à Doutora Joana Ferreira pela orientação científica, estruturação e sentido crítico empregue a esta dissertação. Agradecer-lhes ainda pela disponibilidade, partilha de conhecimentos técnicos e metodológicos aliados aos seus comentários sempre oportunos e valiosos.

Agradeço também à Ana Patrícia Fernandes (do GEMAC), pela generosidade, disponibilidade, tempo dispensado e partilha de conhecimentos.

Aos meus pais, por terem sido os impulsionadores da minha vida académica. Pelos ensinamentos e educação, por me incutirem o gosto pela aprendizagem constante, pelos princípios passados, pela coragem transmitida em cada “adeus”, pela confiança e pela pessoa em que me tornei.

À minha irmã porque, desde que me conheço que, faz parte de tudo aquilo que faço. Obrigada por seres o meu pilar e por toda a cumplicidade que nos une.

Ao Marco, por todas as vezes que estive ausente, mesmo estando presente. Pela compreensão e tolerância de todas as minhas crises de mau feitio, ansiedade e pouca paciência.

A todos os meus amigos em geral, que de uma forma ou de outra me ajudaram “a levar este barco a bom porto”. Por toda a atenção dispensada, por toda a troca de conhecimentos, por todas as dúvidas tiradas, o meu mais sincero agradecimento.

Palavras-chave

Deteção remota, dióxido de azoto, OMI, qualidade do ar.

Resumo

O presente trabalho tem como principal objetivo efetuar o estudo sobre a variação da composição da baixa troposfera recorrendo a dados de satélite. O trabalho desenvolvido incidiu sobre Portugal Continental e analisou, durante o ano de 2009, o dióxido de azoto (NO_2) sobre uma perspetiva espacial, que envolveu a análise de dados recolhidos a partir do *Ozone Monitoring Instrument* (OMI) a bordo do satélite AURA, e dados de concentrações de NO_2 obtidos nas estações de monitorização da qualidade do ar, rurais de fundo, da rede de monitorização nacional.

A metodologia utilizada compreendeu a análise do perfil diário do poluente, a verificação do cumprimento da legislação legal em vigor (Decreto-Lei n.º 102/2010) e a obtenção de uma reta de regressão linear que além de permitir analisar a correlação entre os valores, permitiu estimar concentrações de NO_2 à superfície com base em dados de satélite, obter a distribuição espacial dessas concentrações e avaliar a aplicabilidade do modelo de regressão linear na estimativa de concentrações de NO_2 à superfície.

O estudo permitiu concluir que durante o período de análise não se verificaram excedências em nenhuma das estações de monitorização selecionadas. Os valores de correlação obtidos através da análise das séries temporais são baixos e o valor do coeficiente de correlação obtido através da reta de regressão linear que resulta da análise integrada dos valores médios mensais obtidos através dos dados de satélite e das estações de monitorização assume o valor de $R = 0,57$.

O estudo permitiu ainda inferir sobre a sazonalidade e variabilidade das médias mensais estimadas, O padrão resultante desta estimativa é o esperado para o poluente atmosférico em questão, apontando os valores mais elevados de concentração para os meses de Novembro, Dezembro e Janeiro que refletem a maior variabilidade do NO_2 nos meses de Inverno.

A utilização de dados de satélite e da metodologia desenvolvida, no âmbito deste trabalho, permitiu obter informação importante sobre a variação espacial das concentrações de NO_2 em Portugal Continental para um ano de estudo, analisar a variação espacial e validar a metodologia com os dados medidos nas estações de monitorização da qualidade do ar. As diferenças encontradas correspondem em média a 53% tendo em conta a concentração média mensal. Os dados de satélite, apesar das várias limitações encontradas, revelaram-se cruciais para o desenvolvimento do trabalho e é efetivamente possível concluir que é viável a comparação entre os dados obtidos pelo satélite e os valores de concentração obtidos pelas estações de monitorização da qualidade do ar.

Keywords

Remote sensing, nitrogen dioxide, OMI, air quality.

Abstract

This work has as main goal to make the study on the variation of the composition of the lower troposphere using satellite data. The work was focused on Portugal (mainland) and analyzed during the year 2009 the nitrogen dioxide (NO_2) over a spatial perspective, which involved the analysis of data collected from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) aboard the Aura satellite, and land by obtaining concentrations of NO_2 through the monitoring stations of air quality, rural background and of the national monitoring network.

The methodology included the analysis of the daily profile of the pollutant, the verification of compliance with statutory legislation in force (Decree-Law nr. 102/2010) and obtain a linear regression that not only allows to analyze the correlation between the values but also allows to estimate NO_2 concentrations at the surface based on satellite data, to obtain the spatial distribution of these concentrations and evaluate the applicability of the linear regression model for estimating NO_2 concentrations at the surface.

The study concluded that during the period under review there were no exceedances in any of the monitoring stations selected. The correlation values obtained through the analysis of time series are low and the value of the correlation coefficient obtained by linear regression line that results from integrated analysis of monthly mean values obtained from satellite data and monitoring stations assumes the value of $R = 0,57$.

The study allowed to infer the seasonality and variability of monthly averages estimated, the spatial pattern resulting from this estimate is the expected to the air pollutant in question, pointing to the higher values, pointing out the higher concentration values for the months of November, December and January that reflect the greater variability of NO_2 in the winter months.

The use of satellite data and methodology developed in this work yielded important information about the spatial variation of NO_2 concentrations over Continental Portugal for a year of study, analyze the spatial and validate the methodology with the measured data in the stations monitoring the air quality. The differences correspond to an average of 53% taking into account the monthly average concentration. Satellite data, despite several limitations, proved crucial to the development of the work and is effectively possible to conclude that it is feasible to compare the data from the satellite and the concentration values obtained by the monitoring stations of air quality.

Índice

Índice de Figuras	ii
Índice de Tabelas	iv
1 Introdução	5
2 Detecção Remota	11
2.1 Princípios da deteção remota	12
2.2 O espectro eletromagnético	13
2.3 Mecanismos de interação da radiação eletromagnética com a matéria e a atmosfera .	14
2.3.1 Absorção da radiação na atmosfera	15
2.3.2 Dispersão da radiação na atmosfera	18
2.4 Satélites: tipo de sensores, resolução e órbitas	18
2.4.1 Classificação dos sistemas de deteção remota	19
2.4.2 Caraterísticas dos sensores	19
2.4.3 Caraterísticas orbitais	20
2.5 Missão Aura	21
2.5.1 O espectrómetro OMI	22
2.5.2 Produtos do OMI	24
3 Poluição atmosférica e Qualidade do ar	27
3.1 Poluentes atmosféricos e fontes emissoras	27
3.2 Os óxidos de azoto na atmosfera	28
3.2.1 Emissões atmosféricas	29
3.2.2 Transformação atmosférica dos óxidos de azoto	32
3.2.3 Remoção dos óxidos de azoto da troposfera	34
3.2.4 Distribuição vertical do NO _x na troposfera	36
3.2.5 Impactes associados ao NO ₂	37
3.3 Enquadramento Legislativo da qualidade do ar	37
3.4 A Monitorização da Qualidade do ar	40
4 Caso de Estudo	45
4.1 Caracterização da área de estudo	45
4.2 Caraterísticas climáticas	46
4.3 Recolha e análise de dados	51
4.3.1 Dados das estações de monitorização da qualidade do ar	51
4.3.1 Dados de satélite	55
4.3.2 Análise integrada dos valores medidos pelas estações de monitorização e os medidos pelo satélite.	57
4.4 Validação dos resultados	64
5 Conclusão	67
Referências bibliográficas	73
Anexo A – Análise de Correlação	83

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Esquematização do processo de deteção remota (Adaptado de Aggarwall, 2004).....	12
Figura 2.2 - Espectro eletromagnético (Fonte: Rocha, 2002).....	14
Figura 2.3 - Curvas de distribuição espectral da energia solar na atmosfera/superfície terrestre (Fonte: Moraes, 2002).....	16
Figura 2.4 - Espectro de absorção de NO ₂ na região espectral do visível e do ultravioleta (200-700 nm) a 298K com uma resolução de 1 nm. (Fonte: Schneider et al., 1987)	17
Figura 2.5 - Princípio de medição do OMI (Fonte: Levelt <i>et al.</i> , 2006a)	24
Figura 3.1 – Emissões anuais de NO ₂ referentes ao ano 2009	30
Figura 3.2 - Emissões de NO ₂ (Fonte: APA, 2011).....	31
Figura 3.3 - Emissões de NO ₂ , em 2009, segundo o setor de atividade (Fonte: APA, 2011)	31
Figura 3.4 - Ciclo dos compostos azotados (Adaptado de CE, 1997)	32
Figura 3.5 - Zonas e aglomerações definidas para Portugal Continental (Fonte: Monteiro, 2007) .	41
Figura 3.6 - Distribuição das Estações de Monitorização da Qualidade do Ar (Fonte: APA).....	43
Figura 4.1 - Localização geográfica das estações de monitorização da qualidade do ar em estudo (a vermelho encontram-se representadas as estações que cumprem os requisitos do estudo, a amarelo as estações que iniciaram o estudo mas foram eliminadas por incumprimento dos requisitos)	49
Figura 4.2 - Perfil médio diário das médias horárias de NO ₂ do ano de 2009 para as estações em estudo.....	52
Figura 4.3 - Valor máximo horário de NO ₂ e respetivo valor limite horário (reta a vermelho) para cada estação no ano de 2009	53
Figura 4.4 - Valor das concentrações médias anuais de NO ₂ e respetivo valor limite anual (reta a vermelho) para cada estação no ano de 2009.....	54
Figura 4.5 - Valor mínimo, percentil 25 e 75, mediana e valor máximo das concentrações médias diárias de NO ₂ para o ano de 2009	55
Figura 4.6 - Representação do número de medições existentes para ambos os sistemas de aquisição de dados para o ano de 2009	58
Figura 4.7 - Representação das concentrações médias horárias para o ano de 2009 na estação da Lourinhã.....	59
Figura 4.8 - Representação da reta de regressão linear resultante dos valores das médias mensais dos dados de satélite e das concentrações medidas pelas estações de monitorização da qualidade do ar.....	60
Figura 4.9 - Representação espacial das concentrações de NO ₂ estimadas através da reta de regressão linear para os meses do ano 2009	62
Figura 4.10 - Parâmetros estatísticos calculados para as médias mensais dos valores estimados (mínimo, máximo, médias, P25 2 P75)	63

Figura 4.11 - Concentrações médias mensais de NO ₂ , estimadas e medidas, para as estações de qualidade do ar da Chamusca, Lourinhã, Fernando Pó e Sra. do Minho para o ano de 2010	65
Figura A.1 – Representação resultante da análise de correlação efetuada entre os dados medidos pelo satélite e os medidos pelas estações de monitorização da qualidade rurais de fundo, para o NO ₂ , e no ano de 2009	83

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Requisitos Legais para o NO ₂ e NO _x estipulados pelo DL n.º 102/2010 de 23 de Setembro.....	39
Tabela 3.2 - Tipo de estação quando à influência e ambiente (Adaptado de Borrego e Miranda, 2008).....	42
Tabela 4.1 - Caraterísticas e localização das estações rurais de fundo da qualidade do ar.....	50

1 INTRODUÇÃO

A procura contínua em perceber os fenómenos atmosféricos, o que lhes dá origem, e o que os influencia direta ou indiretamente, é um objetivo que tem acompanhado a Humanidade. Desde sempre o Homem procurou os locais mais altos (montes, árvores, torres, etc.) para daí observar a maior área geográfica possível. Esta procura por pontos estratégicos de observação com o intuito de alargar o seu conhecimento e área de estudo levou-o a desenvolver tecnologias e mecanismos capazes de abranger não só a área terrestre, como a espacial (Blackwell e Chen, 2009).

Desde a revolução agrícola e industrial que o equilíbrio entre os processos físicos, químicos e biológicos do sistema terrestre tem sido perturbado como resultado, por exemplo, do crescimento quase exponencial da população mundial, do aumento do uso de combustíveis fósseis, e consequente aumento das emissões de carbono para a atmosfera, e a intensificação da agricultura devido ao uso frequente de fertilizantes. As alterações ambientais globais resultantes das atividades humanas são mediadas pela química da atmosfera. Alterações importantes como a propagação da poluição do ar aumentam a concentração dos oxidantes troposféricos (incluindo o ozono), a depleção da camada de ozono e o aquecimento global (*Brasseur et al., 1999*).

Para avaliar o significado destas mudanças é necessário conhecer detalhadamente os processos químicos e físicos e controlar globalmente a atmosfera. A avaliação exata do impacto das atividades antropogénicas, atuais e futuras, ou de fenómenos naturais no comportamento do sistema, assim como, a compreensão da atmosfera e da superfície terrestre, requerem um conhecimento a nível do comportamento temporal e espacial dos diferentes compostos que a constituem (gases, aerossóis), de escalas locais a escalas globais na atmosfera, estratosfera e mesosfera (*Gottwald et al, 2006*).

Atualmente, as principais observações da superfície terrestre são obtidas através de técnicas de deteção remota. A observação da Terra a partir do espaço teve um desenvolvimento significativo nos últimos anos, tornando-se imprescindível no acompanhamento de processos ambientais de grande impacto para o Planeta. O crescimento foi vertiginoso, proporcionando uma progressão notável, tanto em quantidade, como em variedade e qualidade de informação disponível para áreas científicas muito variadas.

As primeiras experiências de deteção remota remontam a 1859, quando Gaspar Félix de Tournachan obteve as primeiras fotográficas aéreas utilizando um balão que lhe permitiu ascender aos 80 metros. No entanto, a difusão desta tecnologia deu-se a partir de 1903 com a invenção do avião e com a ocorrência das duas grandes guerras mundiais (Rocha, 2002). Em 1909, Wilbur Wright tirou a primeira fotografia aérea, abrindo caminho a uma longa era de observação desde plataformas remotas. A primeira câmara aérea, propriamente dita, viria a ser desenvolvida durante a primeira guerra mundial em 1915, por J.T.C Moore-Brabazon implicando a segunda guerra mundial um desenvolvimento apurado desta técnica de aquisição de imagens que originou as primeiras películas de infravermelhos. Foram então introduzidos novos sensores, como o radar, e melhorados os sistemas de comunicação. Todas estas inovações foram aplicadas posteriormente a usos civis e desenvolvidas as primeiras aplicações ao conhecimento e controle de recursos naturais. Nos anos 50, desenvolveram-se os primeiros engenhos espaciais (Salinero, 2008) e dez anos mais tarde é lançado o primeiro satélite artificial, o Sputnik, ao qual se seguiu uma larga série de missões civis e militares que permitiram não só a exploração do nosso Planeta, mas também da Lua e dos planetas vizinhos. Por seu lado, o primeiro satélite de observação terrestre viria a ser lançado em 1960, o TIROS-1, e foi pioneiro em missões de observação meteorológica, permitindo um conhecimento e controlo mais ajustado das condições atmosféricas (Maini e Agrawal, 2011).

O estudo da atmosfera ganhou claramente com as observações através dos satélites. Nomeadamente, as regiões remotas, onde as medições terrestres são raras, podem agora ser analisadas regularmente através do espaço, incluindo as variações dos parâmetros geofísicos a pequenas e grandes escalas de forma temporal e espacial (Blackwell & Chen, 2009).

A tecnologia de deteção remota por satélite fornece aos cientistas em geral, e aos ambientais em particular, quantidades de informação de qualidade que não podem ser obtidas por nenhum outro método de observação convencional, como a referida fotografia aérea ou através de campanhas de campo. Apesar de não as substituir, completa-as adequadamente. Esta tecnologia proporciona uma cobertura global, exaustiva e repetitiva da superfície terrestre sob uma perspetiva panorâmica a várias escalas e com transmissão imediata das informações recolhidas em formato digital (Salinero, 2008).

Durante décadas, a monitorização da qualidade do ar foi, na sua maioria, baseada em pontos de medição terrestres e limitada a campanhas de medição através de aeronaves. Por seu lado, as técnicas de deteção remota permitem analisar ao pormenor a

composição da atmosfera e dos gases que a compõe. Esta possibilidade é exequível, devido às propriedades da atmosfera e a sua transparência para os diferentes comprimentos de onda, inclusivamente na região visível do espectro. A deteção remota é largamente usada no estudo de poluentes atmosféricos como o ozono (O_3), o dióxido de azoto (NO_2) o dióxido de enxofre (SO_2), e aerossóis tanto ao nível do solo como das suas colunas verticais. Neste sentido, estas técnicas exploram o facto de cada gás atmosférico ser caracterizado por uma absorção espectral própria e única. Assim, cada molécula de gás ou matéria imitará ou absorverá radiação eletromagnética num comprimento de onda particular consoante o seu estado interno, seja ele de ionização, excitação, vibração ou rotação molecular. A molécula irradiará a radiação eletromagnética a si associada mediante o seu estado interno (Shaub, 2006).

No âmbito da presente dissertação procurou-se aliar a informação sobre a composição de baixa atmosfera obtida a partir de deteção remota e a utilização desta informação numa análise integrada com as medições de concentração de poluentes atmosféricas obtidas pela rede nacional de monitorização da qualidade do ar.

Em Portugal, até ao final da década de 90, a avaliação da qualidade do ar limitava-se à informação recolhida através do reduzido número de estações de monitorização da qualidade de ar, que compunham a rede nacional, e se localizavam apenas nas principais áreas urbanas e em algumas áreas industriais, baseando-se ainda em campanhas de medições pontuais e algumas aplicações de modelos. A partir de 2000, com o aparecimento de novas diretivas (Diretiva 96/62/CE; Diretiva 1999/30/CE), o conhecimento sobre a distribuição das concentrações dos principais poluentes atmosféricos melhorou substancialmente e para tal contribuiu o aumento gradual do número de estações da rede nacional e com a realização, por várias entidades, de campanhas com recurso a tubos de difusão e estações ou equipamentos móveis (Ferreira *et al.*, 2002).

Na generalidade dos países europeus, a maior fonte de poluição atmosférica são as emissões de tráfego rodoviário e Portugal não é exceção. A poluição provocada por esta fonte específica tem vindo a piorar um pouco por todo o mundo contrariamente ao que se passa em relação ao impacte na qualidade do ar por fontes de poluentes domésticas e industriais que tendem a manter-se ou a melhorar. As elevadas emissões de tráfego nas áreas urbanas têm-se refletido nas excedências aos limites impostos pelas diretivas comunitárias, verificando-se excedências pontuais para o dióxido de azoto e frequentemente para partículas (PM_{10}) (Mesquita, 200). Apesar de o dióxido de azoto não

ser um poluente que atraia maior preocupação, quando os limites legais impostos são ultrapassados pode provocar problemas de saúde na população, alterar negativamente os ecossistemas e causar danos materiais. Por outro lado, surge como um indicador útil na avaliação da qualidade do ar no que respeita à poluição resultante do tráfego rodoviário.

O trabalho desenvolvido tem como principal objetivo efetuar um estudo sobre a variação da composição da baixa troposfera, nomeadamente para NO₂, recorrendo a dados de satélite e avaliar a sua aplicabilidade para a estimativa de concentrações do poluente à superfície de Portugal Continental. De forma a alcançar os objetivos propostos, foi seguida a seguinte metodologia:

1. Obtenção dos valores de concentração medidos nas estações de monitorização da qualidade do ar, rurais de fundo, pertencentes à rede nacional de monitorização para um ano selecionado (2009) e para o poluente atmosférico NO₂ e realização da análise de excedências e estatística dos valores de concentração do poluente estudado;
2. Processamento dos dados obtidos através de deteção remota, nomeadamente, os dados do *Ozone Monitoring Instrument* (OMI), a bordo do satélite Aura, para o mesmo poluente atmosférico e mesmo ano de estudo;
3. Realização de uma análise de correlação entre os dados medidos nas estações de monitorização da qualidade do ar e os dados obtidos através de deteção remota. Para o efeito foram elaboradas representações temporais dos valores, obtido um modelo de regressão linear e o seu respetivo coeficiente de correlação (R);
4. Estimativa da concentração de NO₂ à superfície através do modelo de regressão linear obtido e análise dos dados para a área de estudo;
5. Validação dos resultados para verificação da aplicabilidade do método com base nos dados referentes ao ano 2010.

O trabalho realizado encontra-se estruturado em 5 capítulos. O presente capítulo, capítulo 1, resulta num capítulo introdutório e de definição de objetivos e metodologia.

O capítulo 2 aborda numa fase inicial os conceitos e princípios de deteção remota estendendo-se às informações inerentes ao funcionamento desta tecnologia como sendo, o espetro eletromagnético e a sua relevância em deteção remota, os mecanismos de interação da radiação eletromagnética com a matéria e a atmosfera. Por fim, é feita uma abordagem direcionada aos satélites artificiais, em geral, e ao Aura, em particular por servir de base ao desenvolvimento do presente estudo, fazendo-se referência à resolução dos sensores, características orbitais dos satélites que os transportam e descrevendo-se ainda as características do OMI e dos seus produtos de dados.

O capítulo 3 contextualiza o tema da poluição atmosférica, nomeadamente o que concerne a poluentes atmosféricos, em geral, e ao NO_2 em particular, as suas principais fontes de emissão e os impactes negativos resultantes das suas emissões excessivas, terminando com o enquadramento legislativo nacional e comunitário sobre a temática da qualidade do ar.

O capítulo 4 apresenta o caso de estudo. É realizada a caracterização da área de estudo, Portugal Continental, no que diz respeito às suas características geográficas, demográficas, económicas e climatológicas. Além disto, é também descrita a metodologia para o processamento e análise dos dados adquiridos pelas estações de monitorização da qualidade do ar e dos dados recolhidos através de deteção remota. É analisada a existência de excedências, calculados parâmetros estatísticos, obtidas representações gráficas da variação temporal e espacial. Mediante os objetivos específicos a que se propõe esta dissertação, foi efetuada uma análise de correlação das concentrações medidas pelas estações e os valores medidos pelo satélite através da representação temporal destes dados com o objetivo de obter um coeficiente de correlação (R) e uma reta de regressão que permitisse estimar as concentrações de NO_2 à superfície e realizar a representação espacial destes valores. Por último, avaliou-se a aplicabilidade dos dados de satélite para a previsão das concentrações de NO_2 á superfície através da validação dos resultados.

O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho.

2 DETEÇÃO REMOTA

A tecnologia de detecção remota por satélite fornece à comunidade científica, e ao público em geral, informação detalhada relativamente à composição da atmosfera e da superfície terrestre, que não está ao alcance de nenhum outro método de aquisição de dados (Elachi e Zyl, 2006). As aplicações das suas medições são inúmeras e abrangem áreas como a meteorologia, a oceanografia, a geologia, a ecologia e a qualidade do ar (Stephens, 1994).

Deteção remota é a ciência que permite obter informação sobre objetos, áreas ou fenómenos, através de um dispositivo de armazenamento (sensor), tipicamente instalado em satélites, que capta e mede a energia eletromagnética emitida ou refletida e não se encontra em contacto físico com o objeto, área ou fenómeno em estudo (Levin, 1999). Além dos satélites, os sensores podem ser transportados em plataformas aerotransportadas (aviões, helicópteros ou veículos aéreos não tripulados), no entanto, as vantagens oferecidas pela observação espacial por satélite - de entre as quais se destacam a cobertura global, repetitiva e exaustiva da superfície terrestre – têm proporcionado o desenvolvimento e a utilização massiva deste tipo de tecnologia de forma sistemática (Garcia *et al.*, 2012).

No contexto relativo a estudos atmosféricos, detecção remota, compreende a detecção das alterações na radiação eletromagnética e a subsequente determinação da abundância de compostos gasosos e de aerossóis na atmosfera. Para avaliar estas alterações são necessárias medições detalhadas a todas as escalas tanto para a monitorização ambiental, como para testar e verificar o atual conhecimento científico do transporte de poluição, qualidade do ar e as alterações climáticas globais.

Na troposfera, camada de interesse para o presente caso de estudo, o principal objetivo da detecção remota é quantificar a abundância de gases e aerossóis na coluna atmosférica. As concentrações troposféricas estão relacionadas com as fontes de emissão de superfície, naturais e antropogénicas e são fortemente influenciadas pelos processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera (Burrows *et al.*, 2011).

2.1 PRINCÍPIOS DA DETEÇÃO REMOTA

Os componentes que integram o processo de deteção remota encontram-se representados na Figura 2.1. Como requisito principal, o processo supõe uma fonte de energia, na maioria das vezes o sol, que ilumina ou fornece energia ao alvo de interesse. Esta radiação solar, efetua um percurso até à superfície terrestre, atravessando a atmosfera e interagindo com os seus componentes, sendo que estes refletem, transmitem, absorvem ou dispersam a radiação permitindo estabelecer distinção entre os diferentes objetos. A radiação refletida pela superfície terrestre e pela própria atmosfera é recolhida e gravada pelo sensor a bordo do satélite (Garcia *et al.*, 2012).

A deteção remota é, uma área multidisciplinar, que pressupõe o conhecimento de várias disciplinas, como a ótica, a espectroscopia, a fotografia, a informática, a eletrónica e as telecomunicações. Estas áreas integram-se entre si para agir como um sistema completo e único (Champbell, 1987).

A importância da energia eletromagnética no processo de deteção remota encontra-se explicita na definição referida anteriormente e prende-se com o facto de os objetos existentes à superfície terrestre e os componentes existentes na atmosfera se comportarem de forma diferenciada e seletiva face à energia eletromagnética que sobre eles incide. (Meneses, 2012).

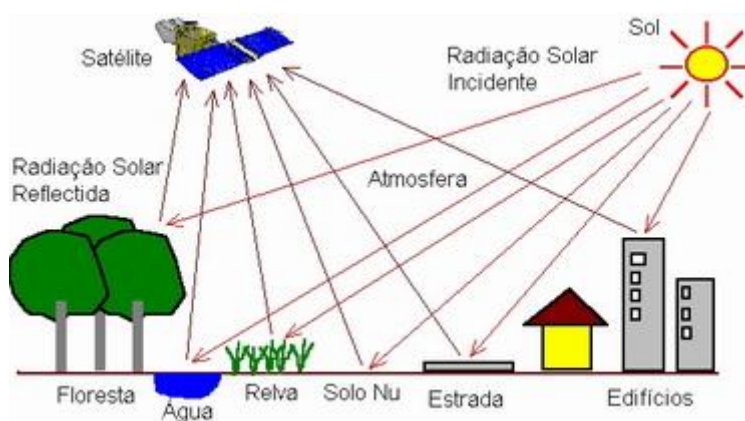


Figura 2.1 - Esquematisação do processo de deteção remota (Adaptado de Aggarwall, 2004)

As técnicas de deteção remota permitem recolher imagens da superfície da terra em vários comprimentos de onda na região do espectro eletromagnético. Uma das principais

características de uma imagem de deteção remota é a região do comprimento de onda que ela representa no espectro eletromagnético (Campbell, 1987).

2.2 O ESPETRO ELETROMAGNÉTICO

O espectro eletromagnético (Figura 2.2) é um *continuum* de energia que varia de quilómetros a nanómetros em termos de comprimento de onda. Este continuum é geralmente dividido em intervalos, designados de bandas espectrais. Divide-se em 7 regiões diferentes – raios gama (frequência mais elevada e comprimento de onda baixo), raios x, ultravioleta, luz visível, infravermelho e ondas rádio (frequência mais baixa e comprimento de onda elevado).

A zona visível do espectro constitui uma parte muito restrita de todo o espectro eletromagnético podendo ser detetada pelo olho humano. É constituída por zonas de várias cores, que vão desde a violeta até ao vermelho. No entanto, as mais importantes para deteção remota são o azul (0,4 – 0,5 μm), o verde (0,5 – 0,6 μm) e o vermelho (0,6 – 0,7 μm).

A radiação do infravermelho (IV) compreende os comprimentos de onda de 0,7 a 100 μm e situa-se entre as bandas do visível e das micro-ondas. A região do espectro do infravermelho divide-se ainda em 3 zonas de interesse para a deteção remota: o infravermelho próximo (0,7 – 1,3 μm), o infravermelho médio (1,3 – 3 μm) e o infravermelho térmico (3 – 14 μm). O infravermelho próximo e médio constituem o infravermelho refletido (Lillesand *et al.*, 2008).

Em suma, as bandas de maior interesse para a aquisição de dados e imagens em deteção remota são, a radiação ultravioleta, a zona do visível, o infravermelho refletido e térmico e a radiação eletromagnética na banda das micro-ondas (Richards e Jia, 2006).

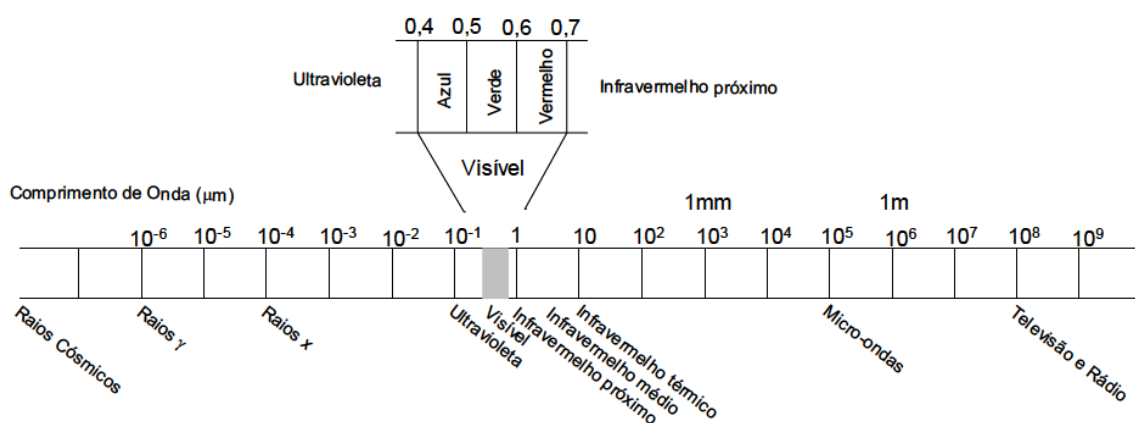


Figura 2.2 - Espectro eletromagnético (Fonte: Rocha, 2002)

2.3 MECANISMOS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM A MATÉRIA E A ATMOSFERA

A detecção remota e a observação da Terra dependem da interação da radiação eletromagnética com a matéria. As interações da radiação eletromagnética com a matéria podem produzir diversas alterações na radiação eletromagnética incidente, como sejam alterações na magnitude, direção, comprimento de onda, polarização e fase que podem ser detetadas e registadas por detecção remota (Levin, 1999). Este tipo de interação proporciona informação útil à análise da composição química complexa existente na atmosfera (Burrows *et al.*, 2011). Essencialmente ocorrem três tipos de interações: absorção, reflexão e transmissão (Lillesand *et al.*, 2003):

- Absorção - quando ocorrem trocas de energia entre os fótons e os átomos que constituem o objeto originando transformações físicas no mesmo, como o aumento da temperatura.
- Reflexão - quando ocorre o reenvio de uma porção da radiação incidente sem alteração da sua frequência.
- Transmissão - quando a radiação incidente atravessa o objeto sem interagir com as suas partículas.

As interações, com qualquer tipo de matéria, são seletivas em relação à radiação eletromagnética e são específicas para esse tipo de matéria, dependendo principalmente das propriedades da sua superfície, estrutura atômica e molecular (Levin, 1999).

Além da matéria, a radiação eletromagnética interage com a atmosfera e os seus constituintes. A atmosfera terrestre é composta por gases, incluindo o dióxido de carbono

(CO₂), oxigénio (O₂), ozono (O₃), azoto (N₂), árgon (Ar), vapor de água e aerossóis. De entre estes compostos, o CO₂, o O₃ e o vapor de água são os principais responsáveis pela interação entre a energia eletromagnética e os compostos da atmosfera. (Chuvieco, 1995). Além destes, estão presentes na atmosfera, em menores quantidades, outros gases como o monóxido de carbono (CO), o metano (CH₄), o monóxido de azoto (NO) e o óxido nitroso (N₂O). Apesar da interferência destes gases ser necessariamente menor a sua importância em estudos de poluição atmosférica é igualmente relevante.

Em termos percentuais, estima-se que a energia que chega ao solo, não provém, na sua totalidade, diretamente do sol (22%) mas também da dispersão e reflexão provocadas pelos constituintes atmosféricos (78%). A Terra reflete uma parte dessa energia (4%), absorvendo 47% (22% de energia direta e 25% de energia difusa) do total de energia incidente na superfície (Peixoto, 1981).

2.3.1 ABSORÇÃO DA RADIAÇÃO NA ATMOSFERA

A absorção é o um processo pelo qual a atmosfera terrestre interage com a radiação eletromagnética.

A atmosfera comporta-se como um filtro seletivo para os comprimentos de onda, de tal forma que em algumas bandas do espectro eliminam praticamente qualquer possibilidade de observação remota (Chuvieco, 1995). Em contraste com a difusão, este fenómeno faz com que moléculas de gás presentes na atmosfera absorvam energia em vários comprimentos de onda. Os gases absorvem radiação em zonas específicas do espectro, designadas de bandas de absorção, resultando em processos muito complexos relacionados com as propriedades vibracionais e rotacionais das moléculas de vapor de água, CO₂ ou O₃ causando transições no nível energético dos átomos (Mather, 2004). Na Figura 2.3 encontra-se representada a distribuição do espectro de energia eletromagnética do sol, no topo da atmosfera, e à superfície, observada ao nível do mar para o O₃, o O₂ e o vapor de água.

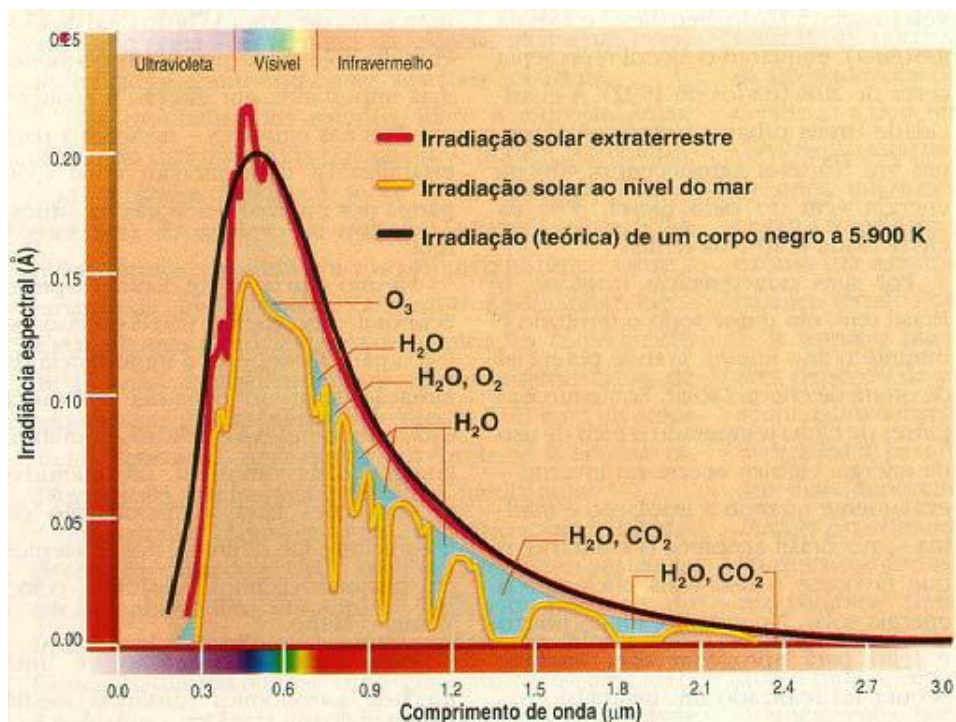


Figura 2.3 - Curvas de distribuição espectral da energia solar na atmosfera/superfície terrestre (Fonte: Moraes, 2002)

Grande parte da energia solar (cerca de 70%) encontra-se concentrada na faixa espectral compreendida entre os 0,3 e os 0,7 μm . Sendo esta a zona que apresenta menor absorção por parte da atmosfera, a maioria da energia solar incidente atingirá a superfície terrestre. Na região do ultravioleta e visível, o principal gás que absorve energia eletromagnética solar é o ozono. Por esta razão se torna essencial a sua existência e a prevenção da sua camada pois absorve os raios ultravioleta que se revelam letais à vida animal e vegetal (Moraes, 2002).

Existem regiões do espectro eletromagnético onde a absorção atmosférica é baixa, ou seja, em que a transmissividade da atmosfera é elevada e que são designadas por janelas atmosféricas (Sabins, 1997). Nesta região, a atmosfera é transparente à energia eletromagnética proveniente do sol ou da superfície terrestre e é por esta razão que esta zona é utilizada para a deteção remota.

Espetro de absorção do NO_2

No caso concreto do poluente em estudo, o dióxido de azoto absorve radiação ao longo de toda a região visível e ultravioleta do espectro. A radiação com comprimentos de onda

menores do que, aproximadamente, 200 nm é absorvida na atmosfera acima dos 50 km de altitude (Brasseur e Salomon, 1986), a Figura 2.4 apresenta as secções de absorção transversais de NO₂ no intervalo de 200 a 700 nm (Shneider, 1987). Para comprimentos de onda superiores a 274 nm as secções transversais de absorção são dependentes da temperatura e geralmente o diferencial das secções transversais aumenta com a diminuição da temperatura. A recuperação de NO₂ por medições espaciais baseia-se na espectroscopia de absorção UV-visível e é usualmente medido usando o método *Differential Optical Absorption Spectroscopy* (DOAS) (Platt, 1994). O uso deste método implica um conhecimento detalhado das secções transversais de absorção da região de comprimento de onda do UV e visível. Relativamente à medição das secções transversais de absorção de NO₂, a maior dificuldade em as obter, reside na presença do dímero N₂O₄ que se forma em equilíbrio termal com o NO₂, cuja abundância se revela mais acentuada para valores de temperatura mais baixos ou valores de pressão mais elevados (Mérieu *et al.*, 1995) Além de dependente da temperatura, Harder *et al.*, 1997 verificou uma dependência de pressão nas secções de absorção transversais. No entanto, esta dependência de pressão é predominantemente importante para aplicação na alta atmosfera (Finlayson-Pitts and Pitts, 2000).

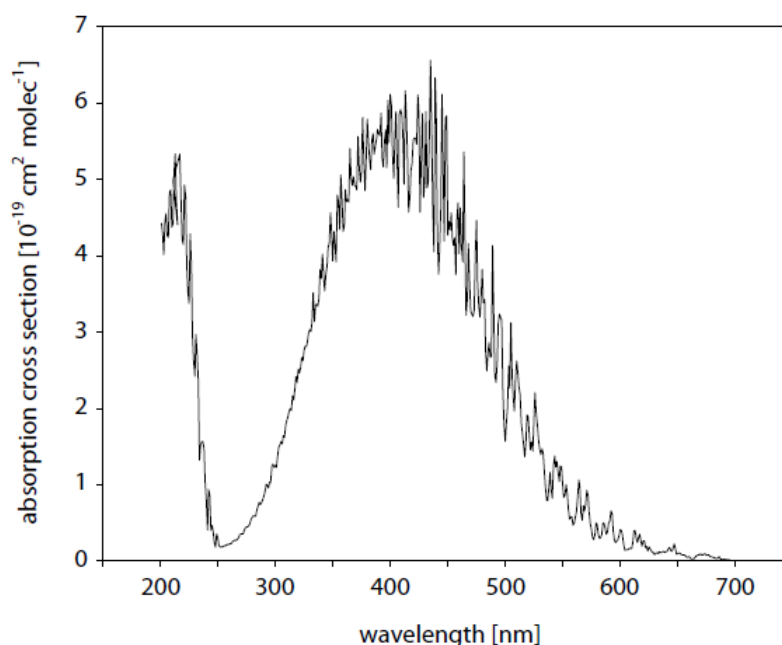


Figura 2.4 - Espectro de absorção de NO₂ na região espectral do visível e do ultravioleta (200-700 nm) a 298K com uma resolução de 1 nm. (Fonte: Schneider *et al.*, 1987)

2.3.2 DISPERSÃO DA RADIAÇÃO NA ATMOSFERA

A dispersão atmosférica resulta de múltiplas interações entre a radiação e os gases e partículas presentes na atmosfera. Quanto menor o comprimento de onda da radiação eletromagnética, maior é o efeito de dispersão atmosférica.

A quantidade de energia dispersada depende do tamanho das partículas, da sua abundância, do comprimento de onda da radiação, espessura da atmosfera através da qual a energia passa e da concentração das partículas e gases presentes na atmosfera. Esta concentração varia ao longo do tempo e está dependente de fatores como a altura do sol, as condições meteorológicas e a estação do ano. Teoricamente a dispersão pode ser dividida em três mecanismos: dispersão de *Rayleigh*, dispersão de *Mie* e dispersão não-seletiva (Campbell, 1987). Os dois primeiros mecanismos constituem a dispersão seletiva e afetam comprimentos de onda específicos do espectro eletromagnético, enquanto a não-seletiva é independente do comprimento de onda.

A dispersão de *Rayleigh* é o mais comum e ocorre quando o diâmetro das partículas é menor que o comprimento de onda da radiação que interage com estas partículas. A tendência mais forte é para que os comprimentos de onda menores sofram este tipo de dispersão. A dispersão *Mie* é causada por partículas com raios entre os 0,1 e os 10 μm , isto é, possuem aproximadamente a mesma magnitude que os comprimentos de onda das regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho térmico. A dispersão de *Mie*, tal como a de *Rayleigh*, é inversamente proporcional ao comprimento de onda e tende a influenciar comprimentos de onda de valores baixos apesar de serem mais elevados quando comparados com os que são influenciados pela dispersão de *Rayleigh*. Por último, a dispersão não-seletiva, como referido anteriormente, é independente do comprimento de onda e é produzido por partículas com raios superior a 10 μm . Este mecanismo ocorre em atmosferas muito densas e resulta em severas atenuações da radiação refletida (Lillesand *et al.*, 2008; Mather, 2006).

2.4 SATÉLITES: TIPO DE SENSORES, RESOLUÇÃO E ÓRBITAS

Existem vários tipos de satélites artificiais com funções e características distintas mediante o objetivo da missão. São exemplos do tipo de satélites existentes: os satélites de comunicação, navegação, meteorológicos, militares e científicos.

Os satélites variam segundo o tipo de órbita que possuem, da carga útil (*payload*) que transportam e do ponto de vista dos instrumentos de aquisição de imagens que os

compõe, da resolução espacial, das características espectrais e da largura da faixa dos visualizada pelos seus sensores [URL1].

2.4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE DETEÇÃO REMOTA

Os sistemas de deteção remota podem ser classificados com base na sua fonte de radiação e na zona do espectro que utilizam para a aquisição dos dados.

A aquisição de informação da superfície terrestre, através da radiação refletida ou emitida por objetos ou elementos atmosféricos é feita com recurso a sensores a bordo de satélites. Estes dispositivos de armazenamento de energia podem ser classificados segundo a fonte de radiação, o princípio de funcionamento e o tipo de produtos obtidos.

Um sistema de deteção remota espacial exige uma fonte emissora de energia que supõe a origem da radiação eletromagnética detetada pelo sensor (Salinero, 2008). Baseado na fonte emissora, os sistemas de deteção remota podem diferenciar-se em passivos ou ativos. Os passivos permitem detetar a radiação solar refletida pelos objetos à superfície da Terra, a radiação térmica ou de microondas emitida por eles e não possuem fonte de energia própria não podendo, por essa razão, ser usados no período da noite. Os ativos usam fontes de radiação artificiais ativas, geralmente, montadas na plataforma de deteção remota. (Maini, 2011).

2.4.2 CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES

As características de um sensor devem ser definidas tendo em conta a sua resolução espacial, espectral, temporal e radiométrica.

De forma simplificada, entende-se por resolução espacial de um sensor, a unidade de menores dimensões geométricas que pode ser identificada na imagem adquirida pelo sensor. Por outras palavras, a resolução espacial de um sensor está relacionada com o tamanho do *pixel* (unidade mínima de informação incluída na imagem) (Rocha, 2002; Carvalheiro, 2006). Normalmente associado ao conceito de resolução espacial está o campo de visão instantâneo (*Instantaneous Field of View - IFOV*) que depende apenas das propriedades geométricas do sensor. O IFVO representa o cone angular de visibilidade do sensor e determina a área da superfície terrestre que é visualizada a uma determinada altura um dado momento de tempo específico (Mather, 2006).

A resolução espectral está relacionada com o número e largura dos intervalos do espectro eletromagnético para a qual é feita a aquisição de imagens pelo sensor. Por outras palavras, refere-se à melhor ou pior capacidade de caraterização dos alvos em função da largura da banda espectral em que o sensor opera. Quanto mais estreitos e numerosos os intervalos, maior é a resolução espectral e por conseguinte mais fácil será a distinção dos objetos ou fenómenos. A banda espectral deve estar adequada de forma a caraterizar o objeto ou fenómeno que se pretende captar (Lillesand *et al.*, 2008).

Por resolução temporal entende-se a periodicidade de um determinado sensor, permitir obter imagens de uma mesma área ou de um mesmo ângulo de visualização. A resolução temporal de um sensor depende das caraterísticas orbitais da plataforma (Aggarwal, 2004).

Por último, a resolução radiométrica representa a sensibilidade do sensor para detetar as variações de intensidade do sinal recebido. (Lillesand *et al.*, 2008).

Além do tipo de sensor existente a bordo da uma plataforma (neste caso um satélite), existem outras caraterísticas suscetíveis de interferir no desempenho do sensor/satélite na captação da informação pretendida. Após ter-se definido o tipo de sensores e de ter-se introduzido o conceito de resolução, é importante perceber em que medida a geometria orbital influencia a aquisição dos dados.

2.4.3 CARATERÍSTICAS ORBITAIS

Relativamente ao tipo de órbita, estas podem ser classificadas segundo a sua orientação, excentricidade e distância à Terra. Uma órbita cujo ângulo de inclinação seja 0° é designada por órbita equatorial e o seu plano orbital é coincidente com o plano equatorial da Terra. Por outro lado, se o seu ângulo de inclinação for de 90° disse-se que a órbita é polar, sendo designada por inclinada quando o ângulo de inclinação varia entre os 0° e os 180° . Segundo a excentricidade podem ser designadas por elípticas (excentricidade entre 0 e 1) ou circulares (excentricidade igual a 0). No que concerne à classificação da órbita relativamente à distância podem ser denominadas de órbita terrestre baixa, média ou geoestacionária. Os satélites que possuem órbitas terrestres baixas circulam a uma altitude de aproximadamente 160 a 500 km da superfície terrestre, possuem períodos orbitais muito mais curtos e menores atrasos na propagação do sinal, revelando-se assim ideais para a aplicação em comunicações. Uma órbita geoestacionária é uma órbita progressiva cujo período orbital é igual ao período de rotação da Terra. Se a órbita se

encontrar no plano do equador e for circular, o satélite permanece estacionário em relação a um determinado ponto da Terra e a órbita é designada por órbita geoestacionária terrestre.

O tipo de órbita mais comum nos satélites de observação da Terra são as órbitas helio-síncronas. Estas podem ser designadas como órbitas terrestres baixas e o seu plano orbital tem uma orientação fixa relativamente à direção Terra-Sol sendo que o ângulo entre o plano orbital e a linha Terra-Sol permanece constante ao longo do ano. Como resultado destas propriedades, a órbita heliossíncrona assegura que o satélite passa sobre uma determinada localização da Terra sempre à mesma hora solar, garantindo assim condições de iluminação idênticas, variando apenas com as estações do ano. Garante ainda a cobertura de toda a superfície terrestre, sendo a sua natureza orbital quase-polar (Maini, 2011).

2.5 MISSÃO AURA

Face aos objetivos da presente dissertação, foi necessária a utilização de dados de satélite que permitissem analisar a variação espacial e temporal do NO₂ e de que forma esses dados estariam correlacionados com as concentrações medidas pelas estações de qualidade do ar. A necessidade para que estes valores fossem o mais representativos possível levou à seleção de um satélite que estudasse a baixa atmosfera e que nele transportasse um espectrómetro com capacidade para obter informações sobre o poluente em questão. Neste sentido, optou-se pelo satélite Aura para a aquisição dos dados. O Aura é um satélite que faz parte do programa Sistema de Observação da Terra criado pela NASA com o intuito de obter a compreensão total do Sistema Terrestre e perceber de que forma os efeitos naturais ou antropogénicos contribuem para as alterações do Ambiente global [URL2]. O programa inclui 3 grandes plataformas: Terra, Aqua e Aura que constituem 3 dos 6 satélites pertencentes à formação *A-Train*, e permitirá obter uma visão global do planeta nunca antes alcançada [URL3].

O satélite Aura é composto por 4 instrumentos a bordo de uma mesma nave espacial. Estes quatro instrumentos (*High Resolution Dynamics limb Sounder* (HIRDLS), *Microwavw Limb Sounder* (MLS), *Ozone Monitoring Instrument* (OMI) e *Tropospheric Emission Spectrometer* (TES)) revelam um importante contributo na resposta às questões científicas para as quais o satélite foi projetado.

O objetivo da missão é estudar a química e a dinâmica da atmosfera terrestre, dando especial atenção à alta troposfera e à baixa estratosfera (5-20 km de altitude). O satélite foi pensado com o fim de obter respostas de como a composição atmosférica afeta e responde às alterações climáticas, revelar quais os processos que estão ligados à qualidade do ar local e global e perceber de que forma a camada de ozono está a recuperar e a reestruturar-se [URL4].

Para o presente trabalho interessa referir e aprofundar as caraterísticas relevantes relativas ao espectrómetro OMI uma vez que foi através deste que foram recolhidos os valores que serviram de base ao estudo.

2.5.1 O ESPECTRÓMETRO OMI

Como referido, o OMI é um dos quatro instrumentos a bordo do satélite de observação terrestre Aura, da NASA. O satélite foi lançado a 15 de Julho de 2004 e segue uma órbita heliosíncrona polar a 705 km de altitude e com 98° de inclinação, atravessando o equador entre às 13:45 \pm 15 minutos (hora local). O planeta é observado em 740 bandas de comprimento de onda durante a passagem do satélite, com uma área de varrimento suficientemente larga capaz de fornecer uma cobertura global em 14 órbitas por dia (Schoeberl *et al.*, 2006).

O OMI possui caraterísticas únicas para monitorização da atmosfera terrestre possuindo uma elevada resolução espacial para todos os seus produtos de dados, de tal forma, que possibilita a deteção da poluição atmosférica à escala urbana. Destas caraterísticas resulta a obtenção de perfis verticais de O₃, a medição de colunas totais de poluentes como o O₃, SO₂, NO₂, BrO, OCIO, HCHO e aerossóis, tendo ainda a capacidade de distinguir entre os diferentes tipos de aerossóis, como poeiras, fumos e sulfatos (Levelt *et al.*, 2006a).

É um espectrómetro que emprega imagens hiperespectrais (imagens com elevada resolução espacial e espectral), por varrimento, em modo de visão nadir (as observações feitas são sobre a área diretamente a baixo do satélite) e que observa a radiação solar nos comprimentos de onda do ultravioleta (UV-1: 270 - 310 nm; UV-2: 310 – 365 nm) e do visível (350 – 500 nm), com uma resolução espectral de 0,42 a 0,63 nm (Kroon *et al.*, 2011). Utiliza dois dispositivos de matriz bidimensional, como ilustra a Figura 2.5, que lhe permite registar instantaneamente espectros em toda a gama do comprimento de onda para 60 píxéis ao longo de uma faixa de 114°. Esta área corresponde a uma amostragem

espacial ampla de 2600 km de largura de varrimento permitindo-lhe uma cobertura global em apenas um dia (Buscela *et al.*, 2006).

O OMI possui três modos diferentes de observação. O mais utilizado designado por *modo de observação global* e observa toda a largura da faixa (2600 km) em toda a gama de comprimentos de onda possuindo um tamanho de *pixel*, na posição nadir, de 13 km x 24 km para os canais UV-2 e visível, e de 13 km x 48 km para o canal UV-1. Os restantes dois modos adicionais são designados por *modo espectral zoom-in* e *modo espacial zoom-in*. Nestes, o tamanho do *pixel* é reduzido para 13 km x 12 km para o canal UV-2 e visível e para 13 km x 24 km no caso do canal UV-1.

No modo espacial *zoom-in*, toda a gama de comprimentos de onda está disponível, no entanto para o canal UV-2 e visível a faixa é reduzida para 725 km. No caso específico do UV-1, toda a faixa está disponível.

No modo espectral *zoom-in*, toda a faixa se encontra disponível ao contrário da gama de comprimentos de onda que está limitada ao intervalo de 306 a 432 nm. Assim, no modo espectral *zoom-in* o canal UV-1 não está disponível e apenas os comprimentos de onda mais curtos, do canal do visível, estão disponíveis. Este facto permite a recuperação do O₃, SO₂, BrO, OCIO, HCHO e dos aerossóis numa resolução espacial elevada de 13 km x 12 km com cobertura global diária (em oposição ao modo espacial *zoom-in* onde a cobertura global diária não é possível). O modo espacial *zoom-in* é usado apenas um dia por mês ao passo que o modo espectral *zoom-in* não é utilizado regularmente (Levelt *et al.*, 2006^a; Levelt *et al.*, 2006b).

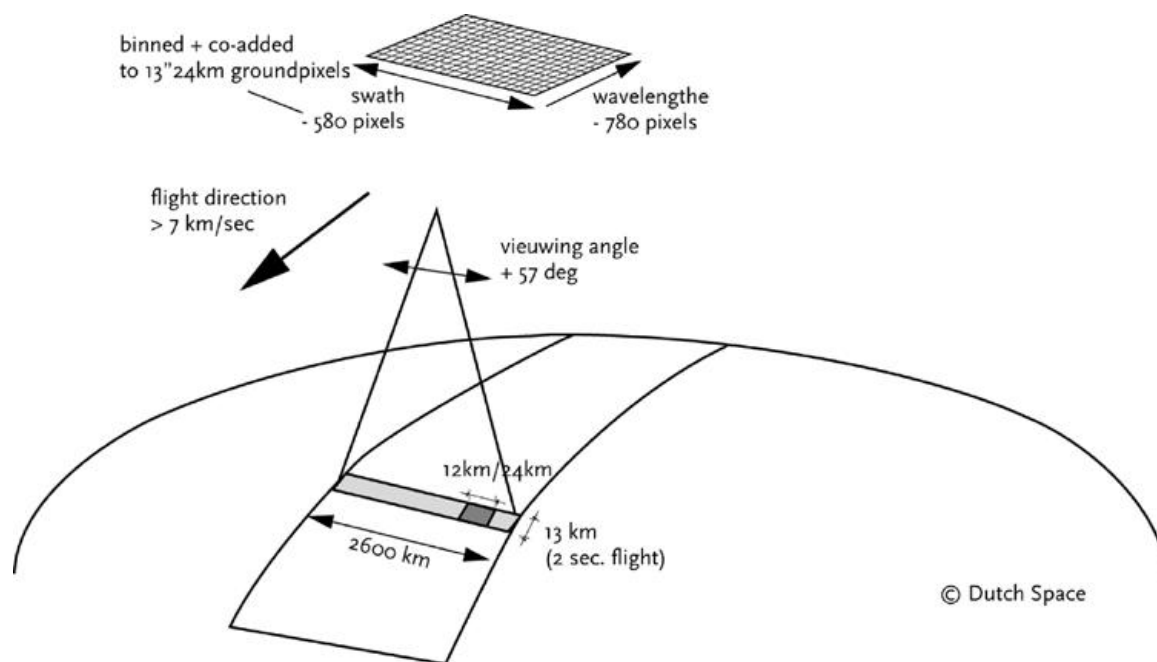


Figura 2.5 - Princípio de medição do OMI (Fonte: Levelt *et al.*, 2006a)

2.5.2 PRODUTOS DO OMI

Os produtos do OMI encontram-se disponíveis em quatro níveis de processamento: *Level 0*, *Level 1B*, *Level 2* e *Level 3*.

Os produtos de nível 0 são produtos originais e não sujeitos a processamento, contêm dados em tempo real assim como os produtos de nível-1B e nível-2. Estes dois últimos (1B e 2) possuem informação sobre as características temporais, espaciais, solares, parâmetros geométricos de visualização, indicadores de qualidade (*quality flags*) e parâmetros geofísicos. Os valores contidos no nível-3 correspondem a valores médios globais (diários ou mensais) (Ahmad, 2003).

Cada ficheiro de produtos de nível-2 agrega parâmetros obtidos apenas na parte diurna da órbita (aproximadamente 53 minutos de duração) com resolução espacial de 13 km x 24 km (tamanho do pixel em nadir) podendo atingir-se maior resolução usando o modo espacial zoom-in (13 km x 12 km). Como referido no subcapítulo anterior, o OMI fornece informação relevante sobre vários gases poluidores da atmosfera. A cada um dos gases mencionados está associado um algoritmo e um conjunto de dados relativos aos parâmetros medidos para cada poluente. No caso de NO₂, o algoritmo correspondente é o OMNO2 e fornece parâmetros como, a latitude, longitude, medições da densidade de NO₂ para a coluna total atmosférica e na estratosfera, refletividade da superfície, um

conjunto de ângulos de visualização (zénite solar e azimute solar; visualização zénite e visualização azimute) e um grande número de parâmetros para avaliar a qualidade dos dados. Estes últimos incluem a qualidade do *pixel*, qualidade da medição, qualidade do ajuste e qualidade do fator de massa de ar.

O indicador de qualidade (*flag*) pode assumir 4 valores distintos: 0 - significam os dados de melhor qualidade; 1 - os dados devem ser usados com cautela. Quando o indicador assume este valor, significa que ocorreram advertências significativas em algum ponto do processo; 2 - dados de qualidade fraca e 3 - os dados que não devem ser usados.

No presente trabalho importa referir a importância do conjunto de dados relativos ao nível-2G (L2G), nível de dados selecionado para a análise dos dados necessários a este trabalho. O conjunto de dados deste nível contém o equivalente a um dia de dados de nível-2 (tipicamente 14 órbitas por dia) em que cada um dos pixéis resultantes dos ficheiros L2 armazenados é atribuído a um ponto de uma grelha de 0,25 por 0,25 graus de latitude/longitude [URL5].

3 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E QUALIDADE DO AR

A poluição do ar é usualmente definida como uma condição atmosférica em que as substâncias se encontram em concentrações mais elevadas do que se encontrariam numa atmosfera limpa, podendo originar efeitos nocivos na saúde humana, animais, vegetação materiais (Seinfeld, 1986); encontrando-se diretamente relacionada com a qualidade do ar, uma vez que o grau de poluição na atmosfera permite avaliar a qualidade do ar ambiente (Gonçalves, 2008).

Uma estimativa precisa da qualidade do ar exige um conhecimento detalhado dos processos físicos e químicos de transporte, dispersão e formação dos poluentes atmosféricos, para além da distribuição e intensidade de todas as fontes poluentes, sendo a definição das escalas uma questão de grande relevância (Ribeiro *et al.*, 2010).

Contudo, a poluição do ar, devido às características de circulação atmosférica e devido à persistência de alguns poluentes em se manterem na atmosfera por longos períodos de tempo, exhibe um carácter transfronteiriço que obriga à conjugação de esforços internacionais a nível científico e político.

3.1 POLUENTES ATMOSFÉRICOS E FONTES EMISSORAS

Poluente atmosférico define-se, de acordo com o Decreto-Lei n.º 276/99, de 23 de Julho, como uma substância introduzida, direta ou indiretamente, pelo homem no ar ambiente, que exerce uma ação nociva sobre a saúde humana e o meio ambiente.

Os poluentes atmosféricos resultam de fontes de emissão de origem natural ou antropogénica e com base na sua origem podem ser divididos em poluentes primários, que são emitidos diretamente da fonte para a atmosfera, e secundários que resultam de reações químicas entre os poluentes primários e os constituintes presentes na atmosfera (Arya, 1999).

Como referido, os poluentes atmosféricos podem sofrer fenómenos de transporte e dispersão que os afastam das fontes de emissão que lhes deram origem. Estes fenómenos podem ocorrer em diferentes escalas dependendo da distância a que se propagam e do seu tempo de vida atmosférico.

À escala global, os processos dinâmicos controlam a físico-química da atmosfera. À escala regional ocorre o transporte e a transformação dos poluentes atmosféricos

fortemente determinados pelas condições atmosféricas, onde se incluem as circulações de mesoscala, como as brisas marítimas (Borrego *et al.*, 2006).

3.2 OS ÓXIDOS DE AZOTO NA ATMOSFERA

Os compostos de azoto estão presentes na atmosfera sob a forma de uma grande variedade de compostos (NO , NO_2 , NO_3 , N_2O , N_2O_3 , N_2O_4 , e N_2O_5). De entre os óxidos de azoto, o monóxido de azoto (NO) e o dióxido de azoto (NO_2) ocupam um papel de elevada relevância na química da atmosfera atuando como precursores de uma série de substâncias que aumentam a capacidade oxidante (O_3) e a capacidade ácida (HNO_2 , HNO_3) na atmosfera (Feliciano, 2001).

O aumento dos níveis de óxidos de azoto ($\text{NO}_x \equiv \text{NO} + \text{NO}_2$) e dos seus produtos de transformação atmosféricos têm sido uma preocupação prioritária no estudo da poluição do ar nas grandes áreas metropolitanas, durante as últimas décadas. O dióxido de azoto é um dos cinco poluentes atmosféricos que confere elevada preocupação pelos seus efeitos na saúde humana quando inalados (Yuval *et al.*, 2007) e ainda por danificar os ecossistemas pelo seu papel no processo de eutrofização (enriquecimento de um ecossistema com nutrientes químicos) ou chuvas ácidas.

Salomon *et al.* (1999) salientou ainda o efeito direto do NO_2 como absorvedor de radiação solar na região visível do espectro. Observou que, durante os episódios com elevada produção de NO_2 , a radiação solar pode ser reduzida ao nível do solo em cerca de 5-12%. Este efeito, no entanto, é de menor importância, pois o tempo de vida atmosférico do NO_x é curto e os respetivos episódios são espacial e temporalmente limitados.

O NO_x é libertado para a troposfera através de uma grande variedade de fontes de origem natural e antropogénica. Naturalmente, este é emitido como resultado das atividades microbianas nos solos e por acontecimentos naturais que geram calor extremo como as trovoadas e os fogos florestais. No entanto, as emissões ocorrem, predominantemente, como resultado de atividades humanas em processos de combustão de combustíveis fósseis, queima de biomassa e uso de fertilizantes (Badr e Probert, 1993).

3.2.1 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

A inventariação de emissões atmosféricas tem como principais objetivos, a identificação das fontes emissoras e de sumidouros de poluentes atmosféricos, e a quantificação das emissões e remoções associadas a essas fontes e sumidouros. Traduz-se numa ferramenta essencial para o conhecimento das consequências que a atividade humana tem na atmosfera, e uma peça chave para a eleição e definição das políticas de qualidade do ar (APA, 2011), consistindo numa lista da quantidade de poluentes lançada para a atmosfera, numa determinada área geográfica, e num determinado período de tempo, por todas as fontes aí localizadas (Borrego *et al.*, 2008).

A metodologia CORINAIR procurou harmonizar a inventariação das emissões atmosféricas através da definição de categorias de poluentes e fontes poluidoras, juntamente com os procedimentos de validação e verificação. Os inventários atualmente disponíveis são elaborados segundo esta metodologia, e agrupam as fontes poluidoras em 11 categorias (SNAP) (APA, 2011).

Em Portugal, os inventários de emissões atmosféricas tiveram início nos anos 80 e incluíam os seguintes poluentes: óxidos de enxofre (SO₂), dióxido de azoto (NO₂), compostos orgânicos voláteis não metânicos (COVNM), metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) e amónia (NH₃) que viriam a ser alargados mais tarde, em termos de quantidade de poluentes e período de coberto, face ao compromisso de cumprimento ao nível da *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) e do Protocolo de Gotemburgo à *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution* (CLRTAP), bem como dos seus protocolos (APA, 2011).

A elaboração do Inventário Nacional de Emissões e Remoção por Sumidouros de Poluentes Atmosféricos (INERPA) constitui um ponto-chave da política de combate às alterações climáticas, é o banco de dados de referência para o cálculo de metas, para a estimativa de esforços de redução e ainda para a verificação do respetivo cumprimento.

Relativamente ao poluente em estudo, as suas emissões ocorrem, sobretudo nas principais áreas urbanas e resultam principalmente do transporte rodoviário. São relativamente elevadas nos concelhos onde se verificam fontes pontuais associadas à

combustão industrial e produção de energia (Figura 3.1), de acordo com o inventário mais recente disponível.

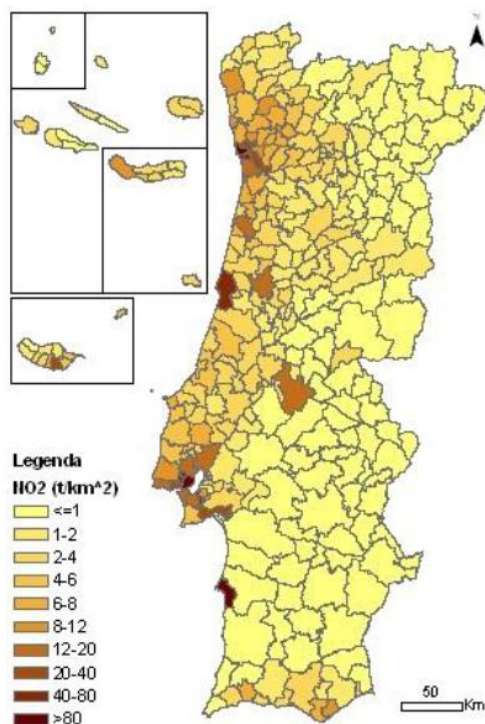
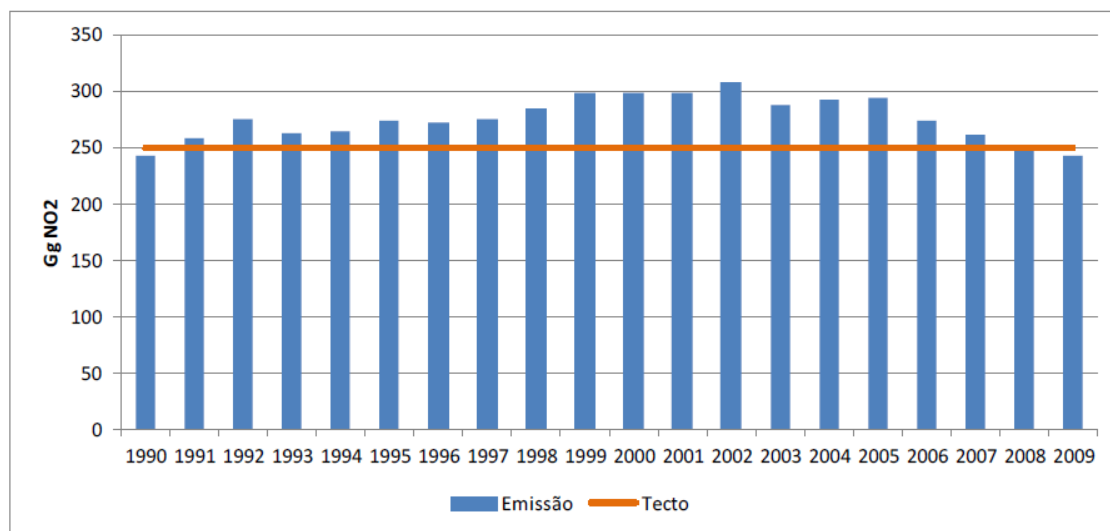


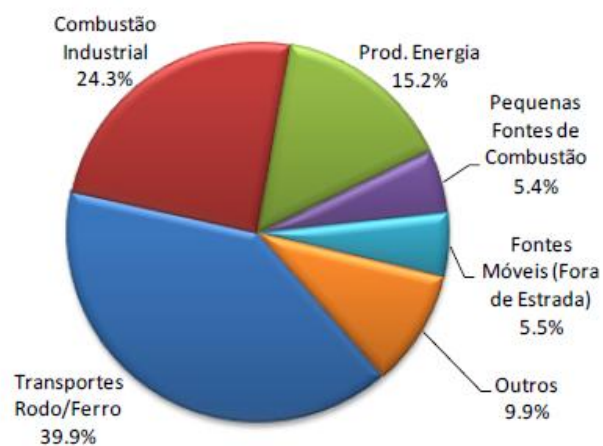
Figura 3.1 – Emissões anuais de NO₂ referentes ao ano 2009

A Figura 3.2 representa a evolução das emissões de NO₂ para o período de tempo de 1990 a 2009.

A tendência de NO₂ mostra um crescimento acentuado das emissões na década de 1990 (+22,3%). A partir de 2000 as emissões de NO₂ estabilizaram-se, com exceção do ano de 2002, observando-se até um decréscimo das mesmas a partir de 2005. Entre 1990 e 2009 a variação de NO₂ é de -1,3%. Para efeitos de verificação do cumprimento do teto anual de emissões de NO₂ estima-se em 242,7 kt para o ano de 2009, valor que se situa 2,9% abaixo pelo imposto no Decreto – Lei n.º 193/2003, que resulta da transposição da Diretiva Tetos (2001/81/CE) e que estabeleceu como meta de emissões atmosféricas para o NO₂ 250 kt.

Figura 3.2 - Emissões de NO₂ (Fonte: APA, 2011)

As emissões de NO₂ no território nacional (Figura 3.3) excluindo as resultantes de fontes naturais, são maioritariamente provenientes do setor do “Transportes Rodo/Ferrovíários” (40%), da “Produção de Energia” (15%) e da “Combustão Industrial” (24%). As fontes naturais contribuem com cerca de 1,8% para o total de emissões de NO₂ e são provenientes do fogo florestal.

Figura 3.3 - Emissões de NO₂, em 2009, segundo o setor de atividade (Fonte: APA, 2011)

3.2.2 TRANSFORMAÇÃO ATMOSFÉRICA DOS ÓXIDOS DE AZOTO

Os óxidos de azoto são essencialmente formados pela oxidação do azoto atmosférico em processos de combustão incompleta a altas temperaturas ($> 800^{\circ}\text{C}$), pela combinação do oxigénio com o azoto do ar. Regra geral, quanto mais elevada a temperatura do processo de combustão, maior quantidade de NO_x é produzida (Celarier *et al.*, 2008).

A maioria das emissões primárias destes compostos são quase exclusivamente sob a forma de monóxido de azoto, sendo que a sequência total de oxidação é a conversão do NO em NO_2 , que em última análise é convertido em HNO_3 e noutros compostos oxidados como o peroxiacetilnitrato (PAN). Mesmo no caso do PAN, o produto final é o HNO_3 desde que o PAN se possa decompor novamente em NO_2 (Finlayson-Pitts e Pitts, 2000). Na Figura 3.4 encontra-se representado o ciclo dos compostos de azoto.

Como referido, o óxido nítrico (NO) é produzido pela reação do azoto (N_2) com o oxigénio (O_2) do ar assim como pela oxidação do azoto no combustível (Finlayson-Pitts e Pitts, 1986), segundo a equação (3.1):

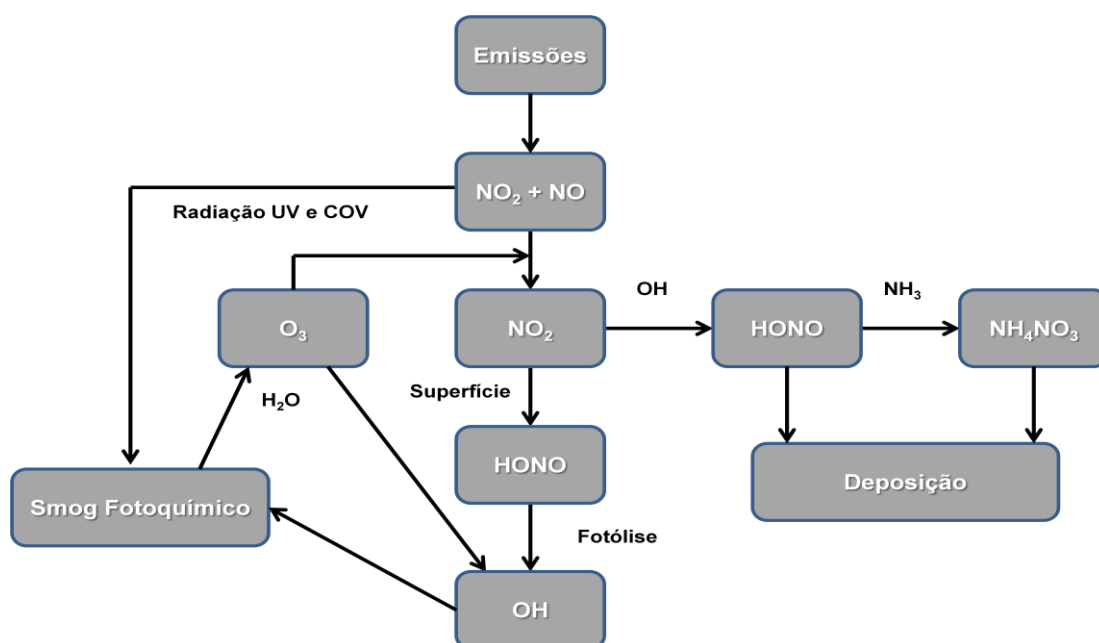


Figura 3.4 - Ciclo dos compostos azotados (Adaptado de CE, 1997)

Quando libertado na atmosfera, o NO é rapidamente oxidado a NO₂ através de processos que envolvem o ozono (O₃) e, radicais existem em atmosferas densamente poluídas, como radicais peroxil (RO₂) e hidroperoxil (HO₂), de acordo com as reações (3.2) e (3.3):

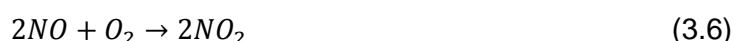


A oxidação através de radicais é muito rápida podendo originar concentrações elevadas de óxidos de azoto especialmente nas vias de tráfego se as concentrações de HNO₂ originarem radicais OH que desencadeiem o processo de oxidação. Na presença de radiação solar, o NO₂ é fotoliticamente decomposto novamente a NO com a subsequente formação de O₃, segundo as reações (3.4) e (3.5):



É gerado um estado fotoestacionário onde a taxa de oxidação do NO é equilibrada pela sua reformação através da dissociação fotolítica do NO₂. Este equilíbrio é perturbado pela presença de compostos orgânicos voláteis (COV's) e outros compostos que podem ser oxidados a radicais peróxido. Durante a noite, a oxidação do NO pelo O₃ prossegue, até que o NO ou o O₃ se esgote totalmente.

O NO pode ainda ser oxidado pelo oxigénio molecular, segundo a reação (3.6):



Esta reação é normalmente muito lenta para gerar níveis de NO₂ com contribuição significativa para o ambiente. No entanto, a reação possui um coeficiente de temperatura negativo e durante episódios persistentes de inverno, a baixas temperaturas, os níveis de NO podem atingir valores superiores a 650 ug.m⁻³ durante vários dias e levar a contribuições consideráveis (Bower *et al.*, 1994).

Outros óxidos de azoto, como o NO₃ e N₂O₅, estão presentes na atmosfera em concentrações relativamente baixas, não obstante, participam de forma importante na química atmosférica. O ácido nítrico é um produto de oxidação do NO₂ na atmosfera, o amoníaco (NH₃) é emitido principalmente por fontes naturais e, finalmente, os sais de

nitrato e de amónia não são emitidos em quantidades significativas, mas resultam da conversão atmosférica de NO, NO₂ e NH₃ (Seinfeld e Pandis, 1998).

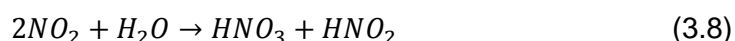
3.2.3 REMOÇÃO DOS ÓXIDOS DE AZOTO DA TROPOSFERA

Existem uma série de mecanismos que promovem a remoção do NO_x da troposfera. Entre eles incluem-se a fotólise de NO₂ e a reação deste e do NO com o OH, o O₃, o NO₃, HO₂, RO₂ e RO (Finlayson-Pitts and Pitts, 1986). No entanto, a maioria destas reações não representam um papel muito importante na remoção de NO_x: a fotólise do NO₂ (reação 3.4) depende de parâmetros como a latitude, a estação do ano, o ângulo solar zénite e da cobertura das nuvens. As constantes de velocidade fotolíticas típicas de Verão correspondem a tempos de vida de NO₂ de apenas alguns minutos, verificando-se tempos de vida similares para as reações com o HO₂ e RO₂. No entanto, as moléculas de NO formadas através da fotólise do NO₂ são subsequentemente reoxidadas a NO₂ (reação 3.2), e os produtos de reação do NO₂ com o HO₂ e o RO₂, não formam sumidouros importantes, mas decompõem-se novamente nos reagentes (com exceção para algumas condições especiais da alta troposfera). Por outro lado, a reação do NO₂ com o RO origina um tempo de vida do NO₂ na ordem dos 2 meses que a torna muito lenta e por essa razão pouco significativa como coletor de NO₂ (Finlayson-Pitts and Pitts, 1986).

Os mecanismos que afetam significativamente o tempo de vida do NO_x na troposfera estão diretamente relacionados com a deposição seca e com a oxidação deste a HNO₃ pelo OH, segundo a reação (3.7):

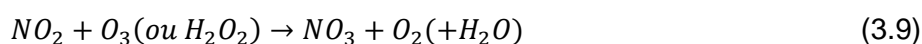


A conversão do HNO₃ e NH₃ gasosos em NH₄NO₃ particulado é um processo relevante para o fenómeno de deposição. A molécula de NH₄NO₃ é higroscópica, possui a capacidade de absorver água, pelo que, a humidade presente no ar irá de alguma forma determinar o tamanho das partículas, influenciando a taxa de deposição. A formação desta molécula é reversível e na presença de concentrações baixas de NH₃ pode voltar a converter-se em HNO₃ (CE, 1997). O HNO₃ é, do mesmo modo, removido por processos de deposição seca ou húmida. O NO₂ é também removido pela reação heterogénea que ocorre nas superfícies com a água, dando origem a HNO₂ e HNO₃, como expressa a reação (3.8):



Durante o dia forma-se fotoliticamente o ácido nítrico através da reação que ocorre entre o radical OH e o NO₂, um composto solúvel, cujo destino principal na troposfera é a deposição na superfície, ou por fenómenos de “rain out” (Brown *et al.*, 2004). Durante a noite, a reação (3.9) entre o NO₂ e o O₃ origina o radical nitrato (esta cadeia de reação tem um papel menos importante durante o dia, pois neste período do dia a molécula de NO₃ é rapidamente fotolizada a NO₂ ou NO). Por conseguinte, o NO₂ e NO₃ reagem dando origem ao N₂O₅. Este último decompõe-se novamente nos seus reagentes originando a reação de equilíbrio (3.10).

Um processo que provoca a perda significativa de N₂O₅ é a sua conversão com água a HNO₃ (3.11) nas superfícies dos aerossóis (Dentener e Crutzen, 1993). Finalmente, a molécula de HNO₃ que é produzida durante o dia e a noite pode depositar-se (Kramm *et al.*, 1995) e, assim, remover efetivamente as moléculas de NO_x da troposfera.



A importância relativa da deposição seca, em comparação com a deposição húmida, para a remoção de uma determinada espécie depende vários fatores. Esses fatores englobam o estado físico da substância (gasosa ou particulada), a quantidade de precipitação na região, a solubilidade das espécies em água, a quantidade de precipitação na região e o tipo de terreno e cobertura superficial (Seinfeld e Pandis, 1998):

Genericamente, a deposição seca é o transporte de espécies gasosas e particuladas da atmosfera sobre as superfícies, na ausência de precipitação. Os fatores que determinam a deposição seca para espécies gasosas ou particuladas, são: o nível da turbulência atmosférica, as propriedades químicas das espécies depositadas e a natureza da própria superfície. O nível de turbulência atmosférica, especialmente na camada mais próxima do solo, determina a taxa de deposição das espécies à superfície. Relativamente às moléculas em estado gasoso, a solubilidade e a reatividade química podem afetar a absorção na superfície (Seinfeld e Pandis, 1998).

O facto de a remoção de NO_x se processar de modos diferentes durante a noite e o dia variando ainda com as condições meteorológicas (afetando, por exemplo, a fotólise do NO₂, de acordo com a reação (3.4)), provoca variações diurnas do tempo de vida do NO_x. O tempo de vida médio, na camada limite, durante todo o ano é de cerca de um dia (Warneck, 2000). No entanto, durante os dias fotoliticamente ativos de verão, pode ser reduzido a apenas algumas horas (Spicer, 1982).

3.2.4 DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DO NO_x NA TROPOSFERA

Para a definição do perfil vertical troposférico de NO_x contribuem vários fatores. A emissão de espécies azotadas, principalmente as emitidas junto ao solo, as suas reações de produção e consumo e ainda o transporte destas espécies pelas variáveis meteorológicas afetam a distribuição vertical troposférica dos compostos azotados. Em áreas industrializadas, as maiores proporções de NO_x encontram-se na camada limite poluída, as baixas concentrações na troposfera livre, aumentando novamente na região da tropopausa devido às trocas entre a estratosfera e a troposfera, resultantes de fenómenos naturais, como os relâmpagos, ou por convecção profunda (Ridley *et al.*, 1994; Brunner *et al.*, 2001).

O perfil de NO₂ é ainda afetado pela divisão do NO_x nas suas espécies NO e NO₂. Esta divisão é determinada pela competição entre as reações (3.4) e (3.8). Próximo da superfície, a constante da reação (3.8) domina a taxa de fotólise da reação (3.4) e, assim, o NO_x é dominado pelo NO₂. Com o aumento em altitude dentro da camada troposférica, a constante de velocidade de fotólise da reação (3.4) aumenta ligeiramente, considerando que a constante da reação (3.8), dependente da temperatura, está a diminuir (Warneck, 2000). Assim, a divisão do NO_x desloca-se no sentido do NO. Finalmente, esta alteração na tendência de divisão resulta num perfil de NO₂ mais pronunciado do que o de NO_x, com a maior parte do NO₂ na camada limite planetária e um decréscimo da relação de mistura de NO₂ com o aumento da altitude, razão pela qual se regista um aumento do tempo de vida do NO_x com o aumento da altitude.

3.2.5 *IMPACTES ASSOCIADOS AO NO₂*

O NO₂ é um gás tóxico, de cor avermelhada, facilmente detetável pelo odor, muito corrosivo e um forte agente oxidante.

A exposição a curto prazo a elevadas concentrações de NO₂ pode resultar em danos pulmonares graves, além de que, a exposição de pessoas possuidoras de doenças pulmonares crónicas, como asma ou doença pulmonar obstrutiva, podem responder negativamente a exposições a curto prazo, como alterações das funções pulmonares ou na resposta das vias respiratórias (CE, 1997).

A pouca afinidade do NO₂ com a água das mucosas, permite ao poluente alcançar as regiões profundas do trato respiratório inibindo algumas funções pulmonares, tais como a redução nas respostas imunológicas que provoca a irritação dos pulmões e diminui a resistência a infeções respiratórias. Mediante exposições crónicas (de longa duração), aumentam os sintomas respiratórios e as probabilidades de doenças respiratórias em crianças (Mesquita, 2009).

Relativamente aos efeitos sobre a vegetação e os ecossistemas, os óxidos de azoto constituem um dos principais componentes que contribuem para a acidificação e eutrofização dos ecossistemas. A acidificação está diretamente relacionada com a incapacidade que o sistema tem para consumir todo o azoto depositado e este concentra-se no solo e em águas superficiais. Os NO_x são absorvidos pela vegetação e dissolvidos no seu interior. Se ao longo do tempo for absorvida uma quantidade elevada de NO₂, esta pode originar uma lesão aguda na vegetação provocando danos no tecidos das folhas impedindo o seu crescimento, podendo mesmo levar a situações de necrose. Os efeitos agudos ocorrem a concentrações muito elevadas e estas raramente são verificadas no ar ambiente, exceto perto de grandes fontes de emissão (CE, 1997).

3.3 ENQUADRAMENTO LEGISLATIVO DA QUALIDADE DO AR

A União Europeia tem vindo a publicar legislação com o objetivo de proteger a saúde humana e de informar e alertar a população, caso necessário. A legislação acelerou assim a necessidade de previsão da qualidade do ar, incluindo o NO₂. A finalidade destas leis é fornecer uma base diária que disponibiliza, ao público em geral e às autoridades, informação sobre o ar ambiente e que funcione como suporte à tomada de decisão para planos e programas estratégicos de redução das emissões e melhoria da qualidade do ar.

A Diretiva 1996/62/CE, de 27 de Setembro, (Diretiva Quadro), relativa à avaliação e gestão do ar ambiente estabeleceu um novo quadro legislativo, definindo os princípios base de uma estratégia comum para todos os Estados Membros da Comunidade Europeia, os quais assentam no estabelecimento de objetivos de qualidade do ar, a fim de evitar, prevenir ou limitar os efeitos nocivos sobre a saúde humana e sobre o ambiente no global, na avaliação da qualidade do ar ambiente, com base em métodos e critérios comuns e na disponibilização de informação sobre qualidade do ar ao público em geral, designadamente através de limiares de alerta.

Os princípios estabelecidos nesta Diretiva Quadro foram transpostos para a ordem jurídica interna pelo Decreto-Lei n.º 276/99, de 23 de Julho, posteriormente alterado nos artigos 9º e 12º pelo Decreto-Lei n.º 279/2007, de 6 de Agosto, determinando, entre outras medidas, a elaboração por parte das CCDR's, de planos de melhoria da qualidade do ar e respetivos programas de execução, destinados a fazer cumprir os valores limite de poluentes atmosféricos dentro de um determinado prazo (CCDRN, 2011).

No âmbito da Diretiva Quadro, surgiram quatro Diretivas-filhas (1999/30/CE, de 22 de Abril, 2000/69/CE, de 16 de Novembro, 2002/3/CE, de 12 de Fevereiro e 2004/107/CE, de 15 de Dezembro) que definiram valores limite de qualidade do ar e de limiares de alerta para poluentes específicos. Relativamente ao NO₂, os valores limite foram definidos pela Diretiva 1999/30/CE, de 22 de Abril. Os objetivos destas diretivas foram a harmonização das estratégias de controlo, dos métodos de medição e calibração e dos métodos de avaliação de qualidade para chegar a uma uniformização das medições em toda a UE e assegurar que a informação sobre as concentrações é disponibilizada ao público (Figueiredo, 2011).

Em Maio de 2008, foi publicada uma nova Diretiva relativa à qualidade do ar ambiente (Diretiva 2008/50/CE), que unifica num só documento a informação legislativa contida na Diretiva-Quadro e nas três primeiras Diretivas-filhas, com efeitos revogatórios sobre as Diretivas 1996/62/CE, de 27 de Setembro, 1999/30/CE, de 22 de Abril, 2000/69/CE, de 16 de Novembro, 2002/3/CE, de 12 de Fevereiro e a Decisão 97/101/CE, de 27 de Janeiro. A nova Diretiva foi transposta para o direito interno pelo Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de Setembro, revogando o Decreto-Lei n.º 276/99, de 23 de Julho, Decreto-Lei Nº 279/2007, de 6 de Agosto, Decreto-Lei Nº 111/2002, de 16 de Abril, Decreto-Lei Nº 351/2007, de 16 de Setembro e Decreto-Lei Nº 320/2003, de 29 de

Dezembro. Esta Diretiva introduziu a obrigatoriedade de regulamentação do poluente PM_{2,5}. Estabeleceu, para o efeito, objetivos de qualidade do ar, objetivos de redução da exposição, um indicador de exposição média e ainda impõe um valor alvo e um valor limite.

Na Tabela 3.1 apresentam-se os parâmetros estatísticos fixados pelo Decreto – Lei n.º 102/2010, de 23 de Setembro, para NO_x e NO₂, que asseguram a qualidade do ar ambiente (CCDRN, 2011).

Tabela 3.1 - Requisitos Legais para o NO₂ e NO_x estipulados pelo DL n.º 102/2010 de 23 de Setembro.

Poluente	Parâmetro	Período considerado	Valor limite (µg/m ³)	Margem tolerância (µg/m ³)
NO ₂	Valor limite horário para proteção da saúde humana	Uma hora	200 (não exceder mais de 18 vezes por ano civil)	2005: 50 2006: 40 2007: 30 2008: 20 2009: 10 2010: 00
	Valor limite anual para proteção da saúde humana	Um ano civil	40	2005: 10 2006: 08 2007: 06 2008: 04 2009: 02 2010: 00
	Limiar de alerta (1)	3 horas consecutivas	400	Não se aplica
NO _x	Nível crítico para proteção da vegetação	Um ano civil	30	Não se aplica

(1) Em locais que sejam representativos da qualidade do ar numa área de pelo menos 100 km², ou uma zona ou aglomeração, consoante o espaço apresentar menor área.

3.4 A MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR

A monitorização e avaliação da qualidade do ar surgem como resposta à crescente preocupação relativamente aos efeitos causados no ambiente e saúde humana pela poluição atmosférica, proveniente quer das fontes antropogénicas quer de fontes naturais.

Em concordância com a Diretiva-Quadro, e no sentido de avaliar e gerir a qualidade do ar, o território nacional foi delimitado em zonas e aglomerações. Entende-se por zona a área geográfica de características homogéneas, em termos de qualidade do ar, ocupação do solo e densidade populacional, e por aglomeração a zona caracterizada por um número de habitantes superior a 250 000 ou em que o número de habitantes se situe entre 250 000 e 50 000 e tenha uma densidade populacional superior a 500 hab/km². Atendendo à informação sobre a orografia, uso do solo, densidade populacional e a campanhas de monitorização da qualidade do ar, foram delimitadas as seguintes zonas e aglomerações em Portugal (Figura 3.5) (DGA, 2001).

- 6 zonas na Região Norte, com 3 aglomerações (Porto Litoral, Vale do Ave e Braga;
- 5 zonas na Região Centro, com 2 aglomerações (Aveiro/Ílhavo e Coimbra);
- 4 zonas na região de Lisboa e Vale do Tejo, com 3 aglomerações (AML Norte, Sul e Setúbal);
- 2 zonas na região do Alentejo;
- 4 zonas no Algarve, com 3 aglomerações (Portimão/Lagos, Albufeira/Loulé e Faro/Olhão).

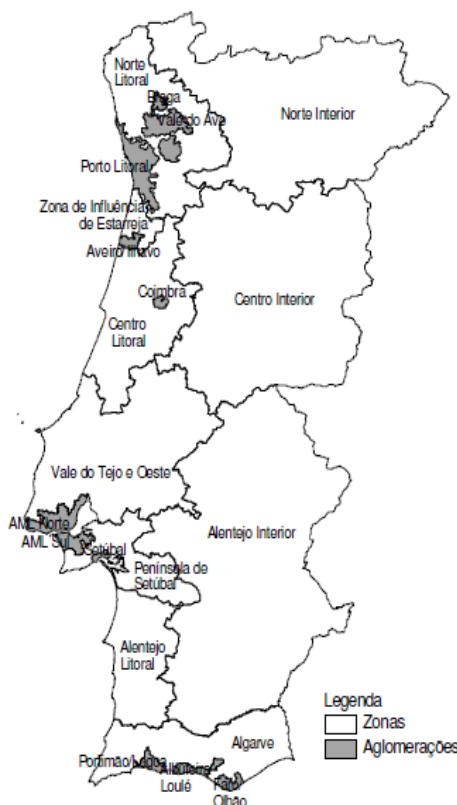


Figura 3.5 - Zonas e aglomerações definidas para Portugal Continental (Fonte: Monteiro, 2007)

A qualidade do ar pode ser avaliada através de monitorização contínua com recurso a estações fixas, de campanhas efetuadas com estações móveis, da utilização de modelos com base das emissões dos diferentes poluentes e nas condições meteorológicas que proporcionem a informação necessária a uma adequada gestão (DGA, 2001).

As estações de monitorização da qualidade do ar estão equipadas com analisadores automáticos, os quais medem em contínuo as concentrações dos vários poluentes (CO , NO_x , SO_2 , O_3 , PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ e BTX) e armazenam as médias de cada quarto de hora, posteriormente agregadas em valores médios horários em que o seu cálculo é efetuado se existirem naquele período de tempo 75% das médias de 15 minutos. Esta recolha dos dados e o seu armazenamento é igualmente feita de forma automática. Os dados recolhidos são sujeitos a um processo de validação. Após validação diária, são enviados para uma base de dados de qualidade do ar nacional *on-line* (<http://www.qualar.org>), onde podem ser consultados pelo público em geral, possibilitando deste modo a gestão de toda a rede de monitorização da qualidade do ar (CCDRalg, 2004; CCDRN, 2009).

Relativamente à estratégia nacional para a avaliação da qualidade do ar, existe um sistema nacional de monitorização implementado em todo o território nacional através de estações fixas localizadas maioritariamente nas grandes áreas urbanas e industriais.

O principal objetivo das redes de Monitorização da Qualidade do Ar, RMQAr, consiste em disponibilizar informação, às autoridades da área do ambiente e ao público em geral, sobre a concentração dos poluentes atmosféricos assim como sobre a influência dos fluxos de poluição transfronteiriça (APA, 2010).

As estações de monitorização da qualidade do ar classificam-se de acordo com o tipo de ambiente e o tipo de influência, e as suas características encontram-se descritas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Tipo de estação quando à influência e ambiente (Adaptado de Borrego e Miranda, 2008)

Classificação	Tipo	Descrição
Ambiente	Urbano	Localizadas em ambiente urbano – cidades
	Suburbano	Localizadas na periferia das cidades
	Rural	Localizadas em ambiente rural
Influência	Tráfego	Monitorizam a qualidade do ar resultante das emissões diretas do tráfego automóvel
	Industrial	Monitorizam a qualidade do ar resultante das emissões diretas da indústria
	Fundo	Não monitorizam a qualidade do ar resultante das emissões diretas de nenhuma fonte em particular; representam a poluição a que qualquer cidadão, mesmo que viva longe de fontes de emissão, está sujeito

Portugal, de acordo com a influência apresenta 39 estações de fundo (19 de ambiente urbano, 12 de ambiente rural e 8 de ambiente suburbano), 17 de tráfego (16 de ambiente urbano e 1 de ambiente suburbano) e 8 industriais (4 de ambiente urbano, 1 de ambiente rural e 3 de ambiente suburbano).

Em termos de distribuição das estações de monitorização da qualidade do ar, verifica-se uma assimetria regional. As estações localizam-se maioritariamente na zona litoral de Portugal, apresentando uma maior densidade nas zonas de Lisboa e Porto (Figura 3.6) (INE, 2010).

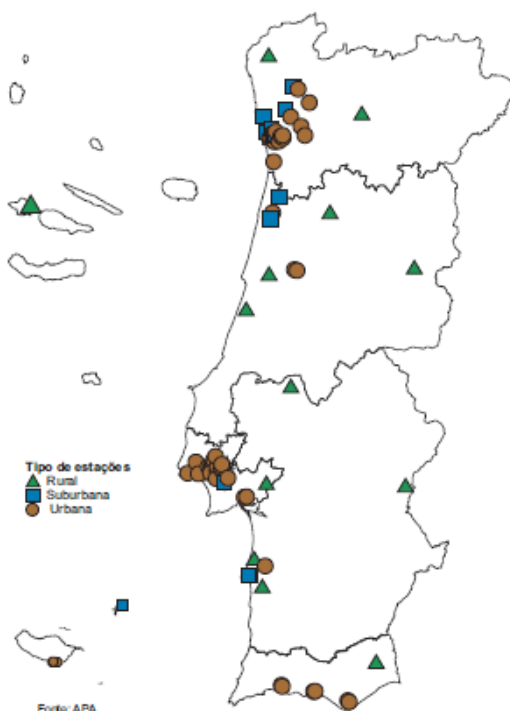


Figura 3.6 - Distribuição das Estações de Monitorização da Qualidade do Ar (Fonte: APA)

Analisando as estações por tipo de ambiente, verifica-se que as estações urbanas centram-se na região da Grande Lisboa, existindo uma no Porto e outra em Coimbra. As estações rurais têm uma dispersão mais homogénea, estendendo-se desde o litoral até ao interior. Salienta-se ainda que no interior do país, apenas estão implementadas estações da qualidade do ar cujo tipo de influência é de fundo (INE, 2010).

4 CASO DE ESTUDO

A área de estudo para a qual foi desenvolvido o presente trabalho é Portugal Continental. Neste sentido, apresenta-se de seguida uma breve descrição da sua localização geográfica, das suas características climáticas, demográficas e económicas, dando-se maior destaque à avaliação da qualidade do ar do território nacional e à definição das estações de monitorização da qualidade do ar de interesse. Por forma a atingir o objetivo principal do trabalho, efetuar um estudo sobre a variação da composição da baixa troposfera recorrendo a dados de satélite, foi desenvolvida uma análise e respetivo tratamento de dados que incluiu a metodologia de aquisição dos dados de satélite e das estações de monitorização da qualidade do ar com o propósito de através de representações temporais ser obtida uma correlação capaz de estimar as concentrações de NO₂ à superfície através do modelo matemático de regressão linear. Por último, avaliou-se a aplicabilidade dos dados de satélite para a previsão das concentrações de NO₂ à superfície através da validação dos resultados.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O território de Portugal Continental localiza-se entre 37° e 42° de latitude norte na extremidade sudoeste da Península Ibérica. Faz fronteira a norte e a leste com Espanha sendo limitado a sul e a oeste pelo Atlântico Norte. A sua extensão Norte-Sul atinge os 561 km e a máxima extensão Este-Oeste é de 218 km totalizando uma área de 80 060 km² (Ribeiro *et al.*, 1991). A geografia de Portugal Continental é denominada por uma mistura de influências Atlântica e Mediterrânea (Ribeiro *et al.*, 1991), com a primeira a dominar a parte Norte do país e a segunda a parte Sul, que se traduz no clima, flora e fauna.

Demograficamente, Portugal, apresenta um contraste evidente entre a fachada atlântica e as terras do interior, acentuando-se a concentração populacional nas áreas metropolitanas de Lisboa e do Porto (IGP, 2005). De acordo com os resultados definitivos dos Censos 2011, residiam em Portugal 10 562 178 pessoas. Mais de 80% da população residente concentra-se em 3 regiões do país. Norte (34,9%), Lisboa (26,7%) e Centro (22,0%). A restante população distribui-se pelas regiões do Alentejo (7,2%), Algarve (4,3%), Região Autónoma da Madeira (RAM) (2,5%) e região Autónoma dos Açores (RAA) (2,3%) (INE, 2011).

Economicamente, os territórios apresentam diferentes estruturas produtivas que foram evoluindo de forma diferenciada, originando padrões distintos na localização das atividades económicas (INE, 2011) e originando uma proporcionalidade direta entre as áreas industrializadas e a densidade populacional. Este facto influencia de forma determinante a variabilidade espacial e a quantidade de poluentes emitidos para a atmosfera.

As zonas mais industrializadas do país distribuem-se pela costa litoral em torno do Grande Porto e Lisboa incluindo a Península de Setúbal. No interior e sul a industrialização é significativamente menos abundante.

4.2 CARATERÍSTICAS CLIMÁTICAS

As condições climáticas são um fator relevante e determinante para a poluição atmosférica e a forma como os poluentes se comportam na atmosfera.

O clima em Portugal Continental é condicionado essencialmente pela posição geográfica do território em relação ao Oceano Atlântico e pela forma e disposição dos principais conjuntos montanhosos (Miranda, P.M.A., et al., 2002). A variação destes fatores climáticos (latitude, proximidade do oceano e orografia), embora pequena, é suficiente para introduzir uma variabilidade significativa na temperatura e, principalmente, na precipitação.

As condições gerais da circulação atmosférica associadas à assimetria orográfica do território nacional provocam uma sensível diminuição da precipitação anual de norte para sul, com valores elevados de precipitação anual média na ordem dos 2200 mm para as regiões montanhosas do norte de Portugal (Serra do Gerês) registando-se os valores mais baixos no sul do país (Baixo Alentejo e Algarve) da ordem dos 400 a 600 mm (IGP, 2005). Aos centros de alta pressão (anticiclones) estão associadas condições de grande estabilidade da atmosfera, com pouca mistura vertical e portanto fracas condições para ocorrer dispersão de poluentes. Os centros de baixa pressão (depressões) associam-se a condições de estabilidade e de grande turbulência na atmosfera favorecendo a dispersão dos poluentes (CCDRalg, 2004).

Contrariamente, a temperatura anual média evolui regionalmente de norte para sul e de oeste para leste. A temperatura mínima no inverno é inferior na parte mais alta da Serra da Estrela, observando-se valores inferiores a 2°C em certas zonas do interior norte e centro. Os valores mais elevados da média da temperatura mínima no inverno (cerca de

10°C) ocorrem na costa sul e na Península de Setúbal. No verão, a média de temperaturas máximas varia entre 16-18°C, na Serra da estrela e valores superiores a 32°C na zona do centro interior e sul (Miranda, P.M.A., et al., 2002).

O gradiente térmico (componente vertical) também influencia a dispersão de poluentes. Na baixa atmosfera, o ar tem tendência a arrefecer em altitude, deste modo o ar mais próximo da superfície, mais quente e mais leve vai provocar um movimento de circulação ascendente, favorecendo a dispersão de poluentes. Pode ainda ocorrer uma inversão térmica originada pela sobreposição do ar quente sobre uma camada de ar frio, por tanto mais pesada, provocando a acumulação de poluentes à superfície e por vezes originando valores de concentrações que são prejudiciais à saúde humana (CCDRalg, 2004).

Também a análise do regime de ventos se torna fundamental pela sua capacidade de condicionar terminantemente os impactes sobre a qualidade do ar devido à sua influência sobre a concentração ou dispersão de poluentes.

A ausência de vento provoca a acumulação da poluição junto das zonas de emissão, sendo a velocidade um fator decisivo na diminuição das taxas de poluição, bem como a sua direção determina a localização dos locais mais suscetíveis de sofrerem influência da poluição (Bastos, 2010).

A ação do vento (componente horizontal) favorece o transporte e a mistura das massas de ar, provocando a dispersão de poluentes e por conseguinte diminuindo a sua concentração no meio recetor (CCDRalg, 2004).

O regime de ventos, em Portugal Continental, é condicionado pelos grandes centros de ação meteorológica (ciclones e depressões de latitudes médias) embora seja muito influenciado pela orografia.

De um modo geral, em Portugal continental prevalecem os ventos do quadrante norte, incluindo os ventos desde noroeste até nordeste, em especial na faixa costeira ocidental. No entanto, nas regiões do interior, quer no norte devido às influências orográficas, quer no sul, verifica-se a predominância de ventos do quadrante oeste, desde noroeste até sudoeste e também em alguns locais de nordeste (Prior, 2006).

Em suma, durante o Inverno e devido à influência das depressões subpolares, predominam as condições de estabilidade, com temperaturas relativamente baixas,

elevada precipitação e um regime de ventos intensos, por vezes com rajadas fortes. No Verão, prevalecem, os ventos fracos na baixa troposfera, céu limpo, temperaturas máximas elevadas e baixa precipitação (Coutinho, 1995).

As caraterísticas orográficas estão diretamente associadas às alterações do regime de ventos e por isso contribuem, também diretamente, para as alterações na dispersão de poluentes. As montanhas influenciam as caraterísticas de escoamento atmosférico. O aquecimento das encostas das montanhas durante o dia e arrefecimento durante a noite fazem com que o ar adjacente à montanha aqueça ou arrefeça por condução e mistura. O gradiente de temperatura gerado entre o ar próximo da montanha e o ambiente circundante dá origem a fenómenos de brisa. Se se verificar uma estabilidade estática neutra, o escoamento sobre as montanhas originará gradientes de pressão na direção do escoamento que juntamente com atrito por fricção à superfície pode produzir separação do fluxo. Este fenómeno vai provocar turbilhões em esteira a montante ou jusante da montanha podendo atingir distâncias de várias vezes a altura da montanha, consoante o declive da mesma (Esteves, 2004). Assim, a circulação local (brisas marítimas e brisas terrestres), é um fator importante na ação de dispersão de poluentes.

O efeito das montanhas relativamente à dispersão de poluentes traduz-se nas mudanças na direção do escoamento principal, que afeta o caminho da pluma, na turbulência, que afeta a dispersão. Na situação em que uma pluma intercepta uma montanha, muitos processos físicos agem no sentido de minimizarem as concentrações (Bastos, 2010).

Em Portugal Continental predominam as áreas de baixa altitude: 71,4% do solo estão a menos de 400 metros, e apenas 11,6% acima dos 700 metros. A repartição das zonas de relevo faz-se de maneira muito desigual no norte e no sul. O sul possui 61,5% das terras baixas, inferiores a 200 metros. O norte, pelo contrário, compreende 95,4% das terras superiores a 400 metros (Ribeiro, 1987).

Tendo presente o objetivo principal deste trabalho de estudar a variação da composição da baixa troposfera através de dados de satélite, recorreu-se à obtenção e análise dos valores de concentração de NO₂ medidos pelas estações de monitorização da qualidade do ar distribuídas pelo território nacional. No entanto, não foram tidas em consideração todas as estações pertencentes à rede nacional de monitorização, uma vez que as observações de satélite tornam-se mais ou menos eficientes mediante algumas especificações relacionadas com as condições da atmosfera. O campo troposférico do NO₂ revela-se muitas vezes muito heterogéneo, variando significativamente. Esta variação pode ir desde as dezenas até às centenas de metros e em gamas de valores

menores que 10^{15} cm^{-2} ao longo de zonas rurais de fundo até valores superiores a 10^{16} cm^{-2} em zonas urbanas e industrializadas. Quando as medições são feitas próximo das fontes de emissão de NO_2 as medições do OMI tendem a subestimar as medições terrestres (Celarier, *et al* 2008). Zonas demasiadamente poluídas, como é o caso de zonas muito industrializadas e demograficamente muito povoadas, tendem a diminuir a transmitância da atmosfera, resultando num decréscimo da incidência da radiação solar direta na superfície provocando maior absorção e espalhamento por parte das partículas suspensas na atmosfera, isto é, a camada de poluição absorve e reemite a radiação emitida. Neste sentido, as medições por satélite, tornam-se mais eficazes quando existe o mínimo de efeitos da atmosfera sobre a velocidade e trajetória dos sinais transmitidos. Por esta razão foram tidas em conta as estações de monitorização da qualidade do ar rurais de fundo, por serem as que sofrem menos influência da poluição atmosférica. O estudo teve por base 11 estações de monitorização: Chamusca, Ervedeira, Fernando Pó, Fornelo do Monte, Fundão, Lamas de Olo, Lourinhã, Monte Velho, Montemor-o-Velho, Senhora do Minho e Terena, que se encontram representadas na Figura 4.1.



Figura 4.1 - Localização geográfica das estações de monitorização da qualidade do ar em estudo (a vermelho encontram-se representadas as estações que cumprem os requisitos do estudo, a amarelo as estações que iniciaram o estudo mas foram eliminadas por incumprimento dos requisitos)

Na Tabela 4.1 apresenta-se para cada estação, a sua designação, o tipo de estação em termos de ambiente, a altitude a que situa, o início de funcionamento, localização geográfica e a eficiência de funcionamento da estação.

Tabela 4.1 - Caraterísticas e localização das estações rurais de fundo da qualidade do ar

Estação	Tipo de ambiente	Altitude (m)	Início de funcionamento	Localização		Eficiência horária para NO ₂ (%) para 2009
				Latitude	Longitude	
Chamusca	Rural regional	143	2002-11-01	39,2114	-8,2819	99,8
Ervedeira	Rural regional	60	2003-01-01	39,9230	-8,8910	94,5
Fernando Pó	Rural perto da cidade	57	2007-04-18	38,6356	-8,6906	93,5
Fornelo do Monte	Rural regional	741	2005-09-23	40,6439	-8,0986	95,7
Fundão	Rural regional	473	2003-06-01	40,1353	-7,1753	97,5
Lamas de Olo	Rural regional	1086	2004-02-03	41,3714	-7,7908	86,4
Lourinhã	Rural perto da cidade	143	2008-12-01	39,2783	-9,2456	94,4
Monte Velho	Rural regional	53	1976-01-01	38,0769	-8,7986	99,7
Montemor-o-Velho	Rural perto da cidade	96	2007-09-06	40,1844	-8,6778	79,3
Senhora do Minho	Rural	777	2005-03-11	41,8022	-8,6939	90,7
Terena	Rural	187	2005-02-15	38,6150	-7,3975	98,6

4.3 RECOLHA E ANÁLISE DE DADOS

Para o desenvolvimento do trabalho e tendo como objetivo a recolha de dados que assegurem a representatividade dos resultados, procedeu-se primeiramente à seleção do ano de estudo. Após uma análise, baseada na qualidade/quantidade de dados disponíveis e medidos pelo satélite, assim como pelas estações da qualidade do ar de Portugal Continental, escolheu-se o ano de 2009 como ano de referência. De seguida, descrevem-se as metodologias de aquisição dos dados de satélite e das estações de monitorização da qualidade do ar assim como o seu tratamento e respetiva análise.

4.3.1 DADOS DAS ESTAÇÕES DE MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR

Foram obtidos a partir da base de dados QualAr (www.qualar.org) as concentrações horárias de NO₂ para as estações rurais de fundo para o ano de 2009. Os dados são diariamente validados e enviados para uma base de dados de qualidade do ar nacional, da responsabilidade da APA, onde podem ser consultados pelo público em geral (CCDRN, 2011).

Subjacente ao parâmetro de qualidade/quantidade de dados recolhidos, está o parâmetro que evidencia o funcionamento eficiente da estação de monitorização para um dado poluente. Este parâmetro designa-se por eficiência de funcionamento da estação e é regulamentado pelo Decreto – Lei n.º 102/2010, que define no seu Anexo II os objetivos de qualidade dos dados, propondo para o NO₂ uma taxa de recolha mínima de dados de 90%. Analisando a Tabela 4.1, as estações de monitorização de Montemor-o-Velho e de Lamas de Olo, não cumprem os requisitos mínimos de eficiência para o período de estudo e por essa razão não foram tidas em conta para a continuidade do trabalho.

De forma a perceber e analisar a variação diária das médias horárias do dióxido de azoto, foi obtido o perfil diário médio de cada estação para o ano de 2009, encontrando-se representado na Figura 4.2.

Da análise da Figura 4.2 constata-se que o perfil de médias horárias para o poluente analisado é semelhante para todas as estações em estudo, exceto para as estações da Senhora do Minho e de Fornelo do Monte que apresentam um perfil menos acentuado. Isto é, o decréscimo da concentração de NO₂ entre as 10:00 e as 18:00 que se faz sentir nas restantes estações, não é observado nestas duas de forma tão expressiva. No caso particular da estação da Senhora do Minho existe, ainda que pequeno, um ligeiro aumento de concentração entre as 10:00 e as 13:30, mantendo-se aproximadamente constante até às 18:00. Pode dizer-se que estas estações não possuem um comportamento típico de uma estação rural de fundo. Tratando-se de estações rurais de fundo, as médias obtidas refletem, naturalmente, valores baixos de concentração, sendo os valores mais elevados os obtidos na estação de Fernando Pó.

Departamento de Ambiente e Ordenamento

4.3.1.1 ANÁLISE DE EXCEDÊNCIAS

A legislação em vigor respeitante à avaliação da qualidade do ar prevê o cumprimento de valores limite, limiares e valores alvo a ser verificados para um determinado poluente em cada ano civil.

Com o intuito de analisar o cumprimento dos requisitos legais constantes no Decreto-Lei n.º 102/2011 para o poluente em estudo, foram determinadas as suas médias horárias e anuais. Na Figura 4.3 encontram-se representados os valores máximos das médias horárias de NO₂, assim como o limite horário (200 µg/m³, valor a não exceder mais de 18 vezes durante o ano civil) estabelecido por lei para a proteção da saúde humana para cada uma das estações em estudo.

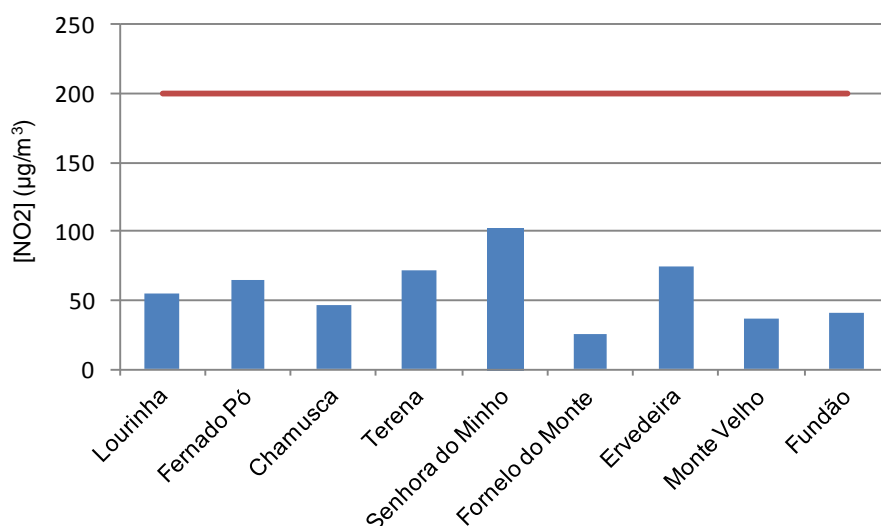


Figura 4.3 - Valor máximo horário de NO₂ e respetivo valor limite horário (reta a vermelho) para cada estação no ano de 2009

Da análise da Figura 4.3 resulta que durante o período de estudo não foram verificadas ultrapassagens ao valor limite imposto por lei para nenhuma das estações de monitorização estudadas o que traduz a não verificação de excedências.

Relativamente ao cumprimento dos valores anuais estipulados por lei, encontram-se representados na Figura 4.4 os valores das médias anuais para as mesmas estações de monitorização e o respetivo valor limite anual (40 µg/m³).

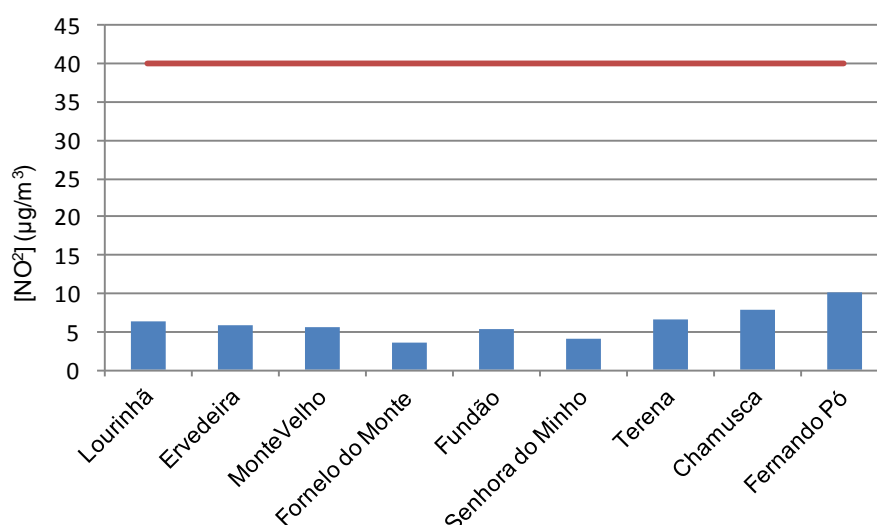


Figura 4.4 - Valor das concentrações médias anuais de NO₂ e respetivo valor limite anual (reta a vermelho) para cada estação no ano de 2009

Tal como se verificou em relação às médias horárias, também para as médias anuais não se verificam situações de excedência. Pode referir-se que para o ano e poluente estudado não existiram incumprimentos legais relativamente aos parâmetros analisados.

4.3.1.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

De forma a perceber a variabilidade dos valores de concentração do poluente nas várias estações de monitorização, foi realizado o cálculo dos parâmetros estatísticos e a sua respetiva representação gráfica. Assim, na Figura 4.5 encontram-se representados os valores máximos e mínimos, a mediana, que representa uma estimativa de tendência central, indicando a presença ou não de assimetria dos dados, e o percentil 25 e 75, que indicam uma estimativa da variabilidade dos dados com base nas concentrações médias diárias monitorizadas pelas estações possibilitando assim retirar ilações relativamente à distribuição, variabilidade e simetria dos dados.

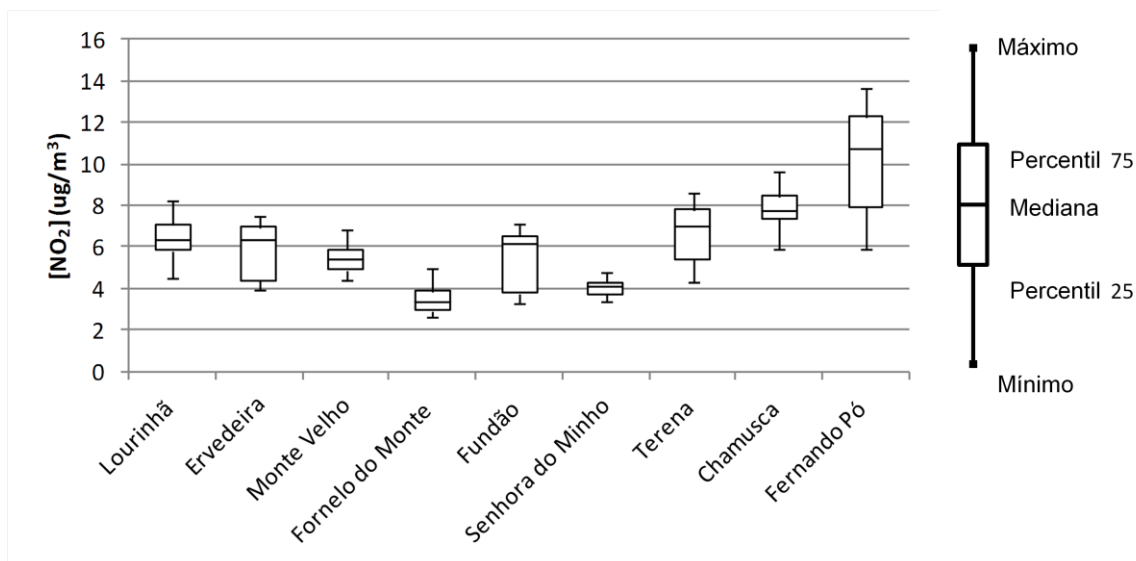


Figura 4.5 - Valor mínimo, percentil 25 e 75, mediana e valor máximo das concentrações médias diárias de NO₂ para o ano de 2009

Analisando a Figura 4.5 pode referir-se que a estação de Fernando Pó regista os valores médios de concentração horários mais elevados. Comparativamente às restantes estações possui valores de fundo elevados, sendo a estação da Chamusca a que apresenta o valor mínimo mais elevado. O valor máximo mais alto foi também registado na estação de Fernando Pó.

As estações de Monte velho, Senhora do Minho e Fornelo do Monte apresentam fraca variabilidade dos dados além de apresentarem os valores de concentração médios mais baixos. O valor mínimo médio horário registou-se na estação de Fornelo do Monte. As estações de Ervedeira, Fundão e Terena apresentam fraca simetria dos seus valores, sendo que a maioria deles assume valores de concentração médios horários abaixo do seu valor médio. A estação de Monte Velho apresenta a melhor simetria entre os valores.

4.3.1 DADOS DE SATÉLITE

A obtenção dos dados de satélite foi efetuada a partir de um portal designado por Giovanni, disponibilizado pelo *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* (GES DISC) (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>). Esta ferramenta *online* permite a visualização, exploração e análise de um conjunto de dados agrupados em portais, promovendo, desta forma, visualizações rápidas dos dados selecionados tendo em conta a sua qualidade e eliminando a dificuldade de desenvolver programas de leitura dos mesmos pois podem ser utilizados diretamente sem recurso a ferramentas de

programação adicionais (Prados *et al.*, 2010). Neste sentido, selecionou-se o portal aura OMI Level 2G que constitui o conjunto de dados recuperados pelo OMI para o nível 2G e definiu-se a resolução espacial escolhendo como domínio as coordenadas correspondentes às estações de interesse para o estudo apresentadas na Tabela 4.1. Após esta definição foi ainda necessário efetuar a seleção do algoritmo de processamento. Mediante o poluente em estudo, a gama espectral de interesse e a zona da atmosfera em análise. Dos algoritmos disponíveis selecionou-se o OMNO2 2G do NO₂ *tropospheric column amount*, por se adequar ao poluente (NO₂) e conter os valores referentes à coluna total troposférica recuperados pelo detetor VIS do OMI na gama espectral dos 405 aos 465 nm [URL7]. Na sequência do enunciado e no que concerne à resolução temporal foram descarregados os dados respeitantes a cada estação de monitorização, para o ano 2009.

Relativamente à qualidade do ar, a ferramenta Giovanni disponibiliza, como referido, serviços e ferramentas que permitem a visualização direta dos dados mediante a área de aplicação pretendida. No que respeita à análise de tendências de poluentes e a sua variabilidade temporal, o Giovanni permite extrair séries temporais que permitirão analisar o comportamento do NO₂ ao longo do ano de estudo para cada uma das estações de monitorização.

Embora não seja possível efetuar a comparação direta entre os valores medidos pela estação de monitorização e os medidos pelo satélite por se encontrarem em unidades diferentes e ainda por a aquisição de dados se processar de forma distinta, uma vez que a estação mede concentrações em locais pontuais e bem definidos ao passo que o OMI efetua observações médias ao longo do seu campo de visão (mínimo de 340 km²), é possível relacionar graficamente a tendência seguida pelo poluente ao longo do tempo para as duas formas de aquisição de valores e analisar de que forma estas duas formas de medição são concordantes através da obtenção de um fator de correlação.

No subcapítulo seguinte, descreve-se qual o procedimento usado para a obtenção deste coeficiente de correlação, e procedimentos seguintes, através da análise integrada dos valores medidos pelas estações de monitorização e os medidos pelo satélite.

4.3.2 ANÁLISE INTEGRADA DOS VALORES MEDIDOS PELAS ESTAÇÕES DE MONITORIZAÇÃO E OS MEDIDOS PELO SATÉLITE.

4.3.2.1 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO

Para obter uma correlação entre os valores medidos pelo satélite e os valores de concentração medidos pelas estações de monitorização da qualidade do ar, procedeu-se à representação temporal dos dados com o intuito de analisar através do modelo matemático de reta de regressão linear o seu coeficiente de correlação linear de *Pearson R*. Este coeficiente indica a qualidade do ajuste entre a reta de regressão e os dados sendo que o seu valor é um número real compreendido entre -1 e 1. Se *R* assumir valores de -1 (variáveis negativamente correlacionadas) ou 1 (variáveis positivamente correlacionadas) a qualidade do ajuste é perfeita; não existindo relação linear, será zero.

É sabido que devido às suas propriedades orbitais, o satélite passará pela área de estudo apenas uma vez por dia. Da análise aos dados adquiridos pelo satélite, deduz-se que esta passagem é feita entre as 12h e as 14 horas locais. Deste modo, procedeu-se à representação gráfica dos valores para cada estação de monitorização e separadamente para as 12, 13 e 14h. Os valores de *R* mais elevados foram obtidos para os dados recolhidos próximo das 13h e por esse motivo serão esses os valores tidos em consideração para a análise dos dados.

No anexo A encontram-se representados os gráficos e retas resultantes desta análise assim como, o seu coeficiente de correlação. Para a obtenção destas representações gráficas, foram apenas selecionados os dias em que se verificaram medições para ambos os sistemas de aquisição de dados. Isto é, os dias em que existiram medições validadas feitas pelas estações e pelo satélite. A escolha do período de medição e a quantidade de medições validadas é um facto de elevada importância uma vez que, um conjunto de dados muito reduzido e que respeite a um período de tempo muito curto, pode limitar as conclusões estatísticas a ser extraídas deles (Celarier, E. A., *et al* 2008). Desta forma, encontram-se representados na Figura 4.6, o número de observações utilizadas para a obtenção dos coeficientes de correlação durante o ano de 2009.

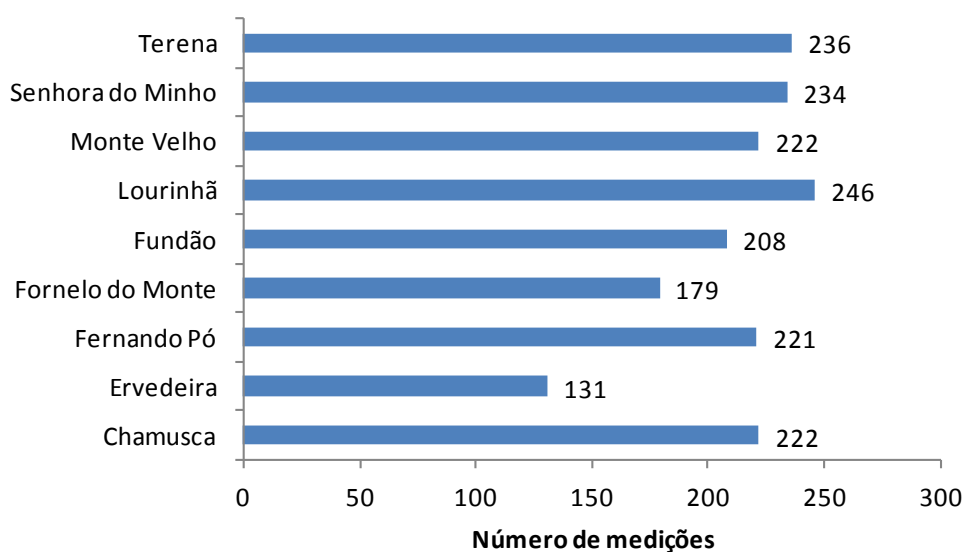


Figura 4.6 - Representação do número de medições existentes para ambos os sistemas de aquisição de dados para o ano de 2009

Analisando os valores de R obtidos, verifica-se que estes são baixos para a generalidade das estações; alguns deles rondam mesmo o valor zero, significando a não existência de correlação. Tendo como base este facto, excluíram-se, numa primeira fase, as estações que apresentem valores de R muito próximos de zero: Fundão e Monte Velho.

Tipicamente, as correlações obtidas entre as medições do OMI NO₂ e as medições efetuadas pelas estações da qualidade do ar são, na generalidade, fortes e com valores superiores a 0,6 (Celarier, *et al.*, 2008).

J. P. Veefkind (Comunicação privada, 2007), efetuou um estudo onde comparou dados medidos pelo OMI NO₂ e os obtidos pela rede da qualidade do ar do território Holandês. O estudo analisou dados medidos por 35 estações diferenciadas em rurais, urbanas e urbanas de tráfego. Foi obtida uma correlação $R = 0,94$ entre os dados medidos pelo satélite e as estações rurais. Pelo contrário, a correlação obtida para as estações urbanas é fraca. Este facto é explicado pela autora como sendo devido à forte variação das condições locais ao longo de algumas centenas de metros, que se revela bem menor do que a resolução espacial do OMI.

Por outro lado, as baixas correlações obtidas neste trabalho podem estar relacionadas com a dificuldade de aproximar exatamente a hora de captação dos dados de satélite à hora de medição das concentrações da estação. A base de dados da QualAr apenas fornece valores médios horários de concentração.

Na tentativa de colmatar a baixa correlação e em busca de resultados mais favoráveis, procedeu-se à análise da tendência dos valores de satélite e da estação em separado. A Figura 4.7 apresenta esta tendência para a estação da Lourinhã, a título de exemplo, para a qual se obteve o melhor valor de R tendo em conta os valores medidos durante o ano de 2009.

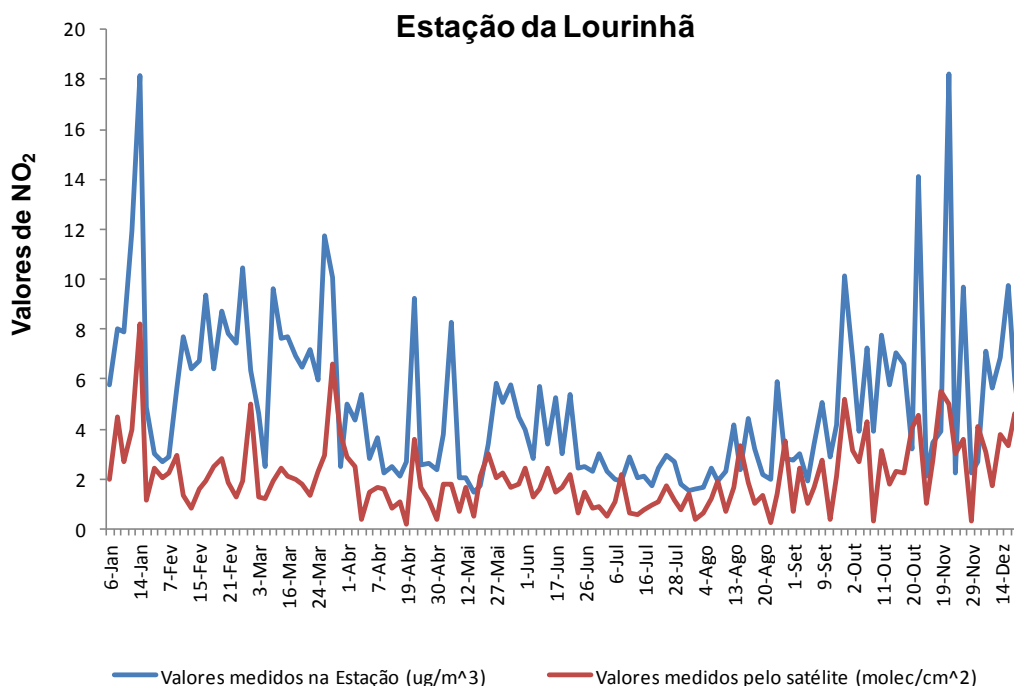


Figura 4.7 - Representação das concentrações médias horárias para o ano de 2009 na estação da Lourinhã

Da análise da Figura 4.7, observa-se que os valores captados pelo satélite e os medidos pela estação seguem uma tendência semelhante ao longo do tempo apesar de, em alguns períodos, esta tendência não se verificar. Posto isto, calcularam-se médias móveis com intervalos de 3, 5, 7, 9 e 11 valores a fim de harmonizar as diferenças tendenciais mais significativas. Obtiveram-se melhorias na correlação em algumas das estações de monitorização, no entanto estas não foram expressivas e optou-se pelo uso das médias mensais de concentração para a obtenção da reta de regressão linear.

4.3.2.2 OBTENÇÃO DA RETA DE REGRESSÃO LINEAR

Como referido, um dos objetivos do estudo é obter uma comparação qualitativa e quantitativa entre as medições feitas pelas estações de monitorização da qualidade do ar e as obtidas através de dados de satélite com o propósito de avaliar a aplicabilidade dos dados de satélite para a previsão da concentração de NO_2 à superfície.

Neste sentido, procedeu-se à obtenção de uma reta de regressão linear que relacionasse os valores médios mensais medidos pelo satélite com os valores médios mensais das concentrações medidas pelas estações da qualidade do ar selecionadas. A reta de regressão linear obtida encontra-se representada na Figura 4.8 e reescrita na equação 4.1.

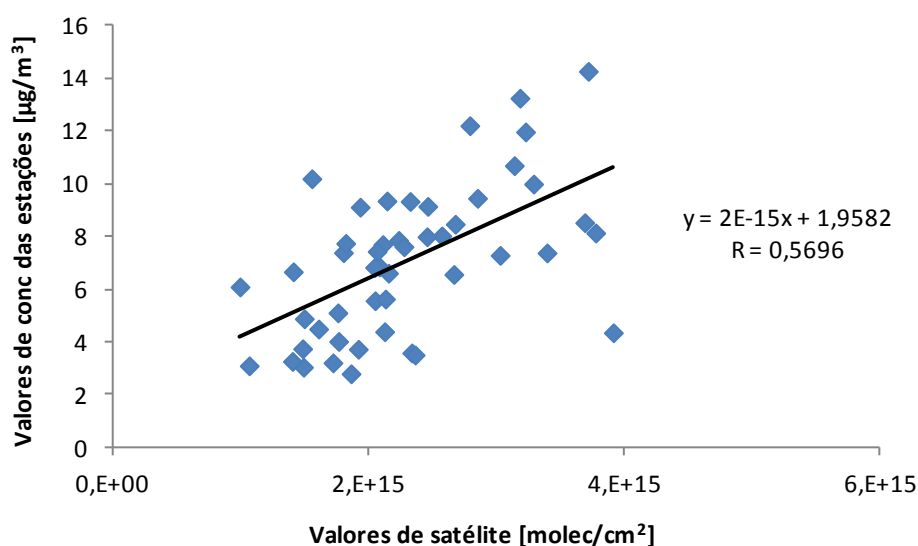


Figura 4.8 - Representação da reta de regressão linear resultante dos valores das médias mensais dos dados de satélite e das concentrações medidas pelas estações de monitorização da qualidade do ar

$$[\text{NO}_2]_{\text{mensal}} (\text{ug/m}^3) = 2 \cdot 10^{-15} \times [\text{medições satélite}]_{(\text{molec/cm}^2)} + 1,9582 \quad (4.1)$$

A correlação obtida ($R= 0,57$) apesar de não se revelar excelente aproxima-se dos 0,6 considerada como “boa” em estudos efetuados e referidos anteriormente (J.P Veefkind, 2007; Celarier et al., 2008).

O modelo de regressão, anteriormente mencionado, foi aplicado para a obtenção da distribuição espacial das concentrações de NO_2 em Portugal Continental a partir da malha dos dados de satélite. Esta representação permitirá por um lado perceber se a estimativa obtida traduz a distribuição atmosférica do poluente, e por outro fazer uma análise sazonal dos valores obtidos.

A obtenção dos dados de satélite foi efetuada do mesmo modo que o descrito na obtenção dos dados de médias diárias pelo portal Giovanni, alterando-se apenas a resolução temporal para a opção: *lat-long map time-average* no sentido de se obterem de forma direta os valores das médias mensais para Portugal Continental no ano de 2009.

As representações espaciais foram obtidas através do programa *Surfer* que por permitirem testar diversos métodos de interpolação, se revela adequado. O método de interpolação utilizado foi o *Kriging*, cuja função é expressar tendências sugeridas pelos dados. Na Figura 4.9 apresenta-se a variação espacial das concentrações de NO_2 estimadas para cada um dos meses do ano de 2009. Nela estão representados os valores de concentração de NO_2 estimados para a superfície de Portugal através das médias mensais dos valores recolhidos pelo satélite para o mesmo poluente. A análise espacial permite identificar as regiões onde os níveis de NO_2 são mais elevados.

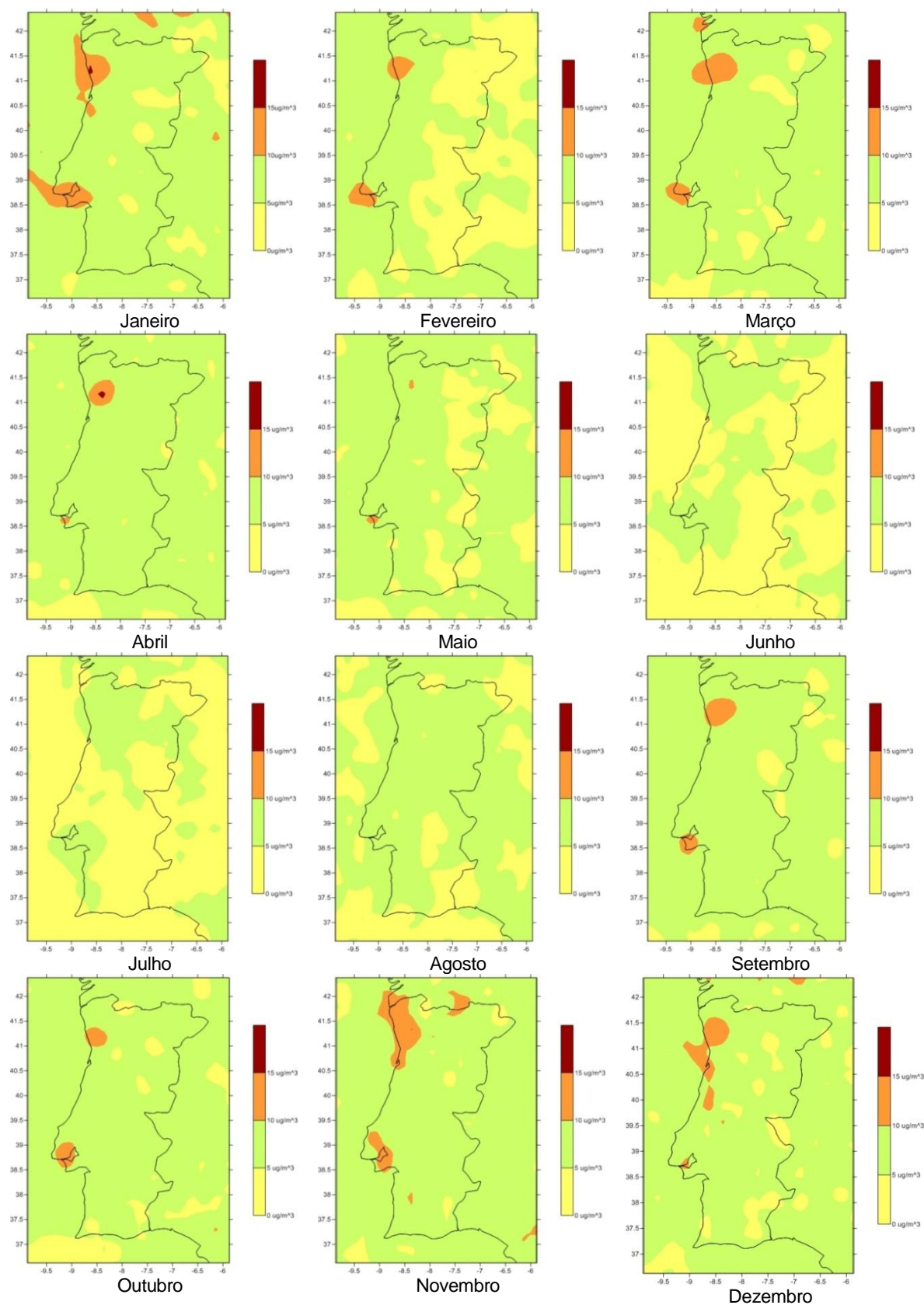


Figura 4.9 - Representação espacial das concentrações de NO₂ estimadas através da reta de regressão linear para os meses do ano 2009

Esta distribuição representa o padrão esperado uma vez que os valores de concentração mais elevados se verificaram nas zonas de maior densidade populacional, zonas industrializadas e principais vias de tráfego. As zonas mais densamente povoadas, áreas metropolitanas de Lisboa e Península de Setúbal, do Porto e área urbana circundante, são as áreas onde ocorrem os valores mais elevados. Tal facto está associado à contribuição do tráfego rodoviário como fonte de emissão de óxidos de azoto para o ar ambiente e das emissões resultantes da densa atividade industrial que se verifica com mais intensidade nestas áreas.

Para além da análise qualitativa dos valores obtidos e representados na Figura 4.9 é indispensável avaliar quantitativamente os valores mensais das concentrações estimadas. Para isso foi efetuada uma análise estatística encontrando-se na Figura 4.10 os valores dos parâmetros calculados.

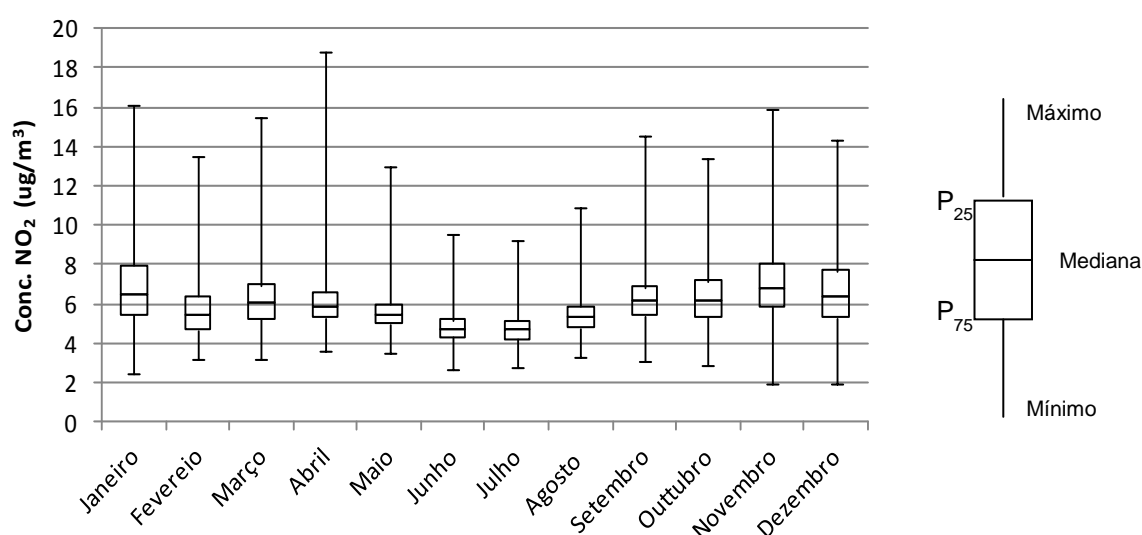


Figura 4.10 - Parâmetros estatísticos calculados para as médias mensais dos valores estimados (mínimo, máximo, médias, P25 2 P75)

Da análise da Figura 4.10 verifica-se que os valores mais elevados da mediana se verificam para os meses de Novembro, Dezembro e Janeiro. Em concordância, também se verificam para estes meses os valores mais elevados de percentil 75 (P75). Os valores obtidos vão de encontro ao esperado, verificando-se maior variabilidade espacial no inverno, com concentrações de NO₂ mais elevadas, presumivelmente refletindo a variação sazonal do tempo de vida do dióxido de azoto na atmosfera.

Tendo em conta que o NO₂ troposférico é produzido principalmente por atividades humanas, como a combustão relacionada com o tráfego e sistemas de aquecimento é, portanto, esperado um valor máximo das médias de concentração no Inverno. Além disso, no Inverno devido às condições de estabilidade atmosférica os valores de concentração dos poluentes atmosféricos também são maiores.

No que diz respeito á representação espacial obtida para estes meses, observa-se que os valores mais altos de concentração se situam na gama dos 10 a 15 µg/m³, sendo que para o mês de Janeiro, se obtiveram valores acima dos 15 µg/m³ apesar de ter sido o mês de Abril com o valor mais elevado com 18,86 µg/m³.

A partir do mês de Maio as concentrações de NO₂ começam a baixar, sendo que se mantém praticamente constantes nos meses de Junho, Julho e Agosto onde se verificam os valores mais baixos das concentrações médias e numa menor variação espacial. O mesmo se pode observar através das representações espaciais da Figura 4.9 onde estes mesmos meses apresentam mapas muito semelhantes em termos de distribuição do poluente, apresentando apenas as duas cores que representam os valores mais baixos de concentração.

Em detrimento disto, no Verão, o tempo de vida destas espécies químicas é mais baixo. Nesta estação do ano, na presença da radiação solar, os óxidos de azoto são consumidos para formar ozono. Devido aos processos de remoção pelas reações fotoquímicas provocadas pela maior intensidade solar as concentrações de NO₂ são fortemente reduzidas.

4.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

O modelo de regressão obtido permite estimar concentrações de NO₂ no ar ambiente a partir de dados de satélite. No entanto, é importante validar o método para verificar a sua aplicabilidade. Para isso utilizaram-se valores de concentração observados em cada uma das 4 estações num determinado ano (diferente do ano utilizado na obtenção da reta que descreve o modelo de regressão linear). A validação dos resultados foi elaborada mediante as seguintes operações:

- a) Aquisição dos dados de satélite para as localizações das estações de monitorização da qualidade do ar;
- b) Obtenção dos valores estimados das concentrações de NO₂ à superfície para o ano de 2010.

Na escolha do ano para a fase de validação teve-se em consideração, tal como na aquisição dos dados, a disponibilidade e qualidade dos dados, assim como a sua fidedignidade. O ano de 2010 foi o ano selecionado para a validação dos resultados. Os dados para as estações da qualidade do ar foram retirados da base de dados da QualAr e os dados de satélite foram descarregados através do *software* Giovanni. Para ambos os métodos de aquisição de dados (satélite e estação), foram calculadas as médias mensais dos seus valores.

As concentrações foram estimadas como descrito no subcapítulo 4.3.3.2 onde, para cada estação, separadamente, se obteve a média mensal das concentrações estimadas a partir da reta de regressão linear para as 13 horas. Os valores estimados foram comparados com os valores de concentração de média mensal efetivamente medidos pelas estações da qualidade do ar para as 13 horas a fim de se verificar o desempenho do modelo.

Apresenta-se seguidamente, na Figura 4.11, a comparação entre os valores estimados e os valores medidos para cada uma das estações de monitorização da qualidade do ar: Lourinhã, Chamusca, Fernando Pó e Senhora do Minho.

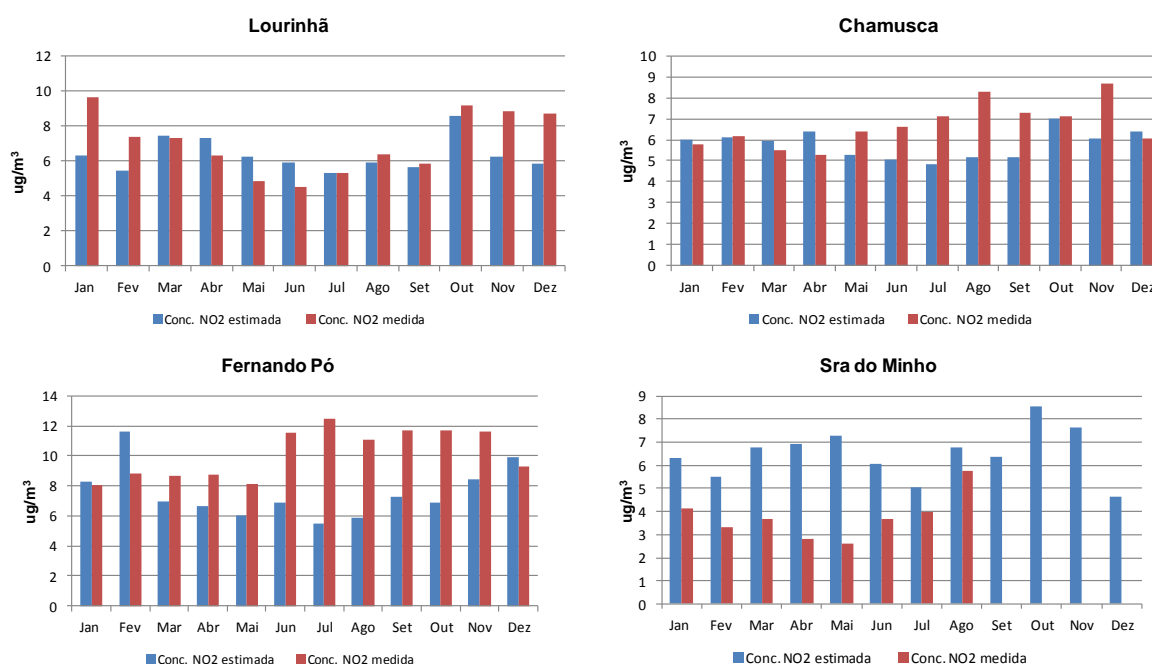


Figura 4.11 - Concentrações médias mensais de NO₂, estimadas e medidas, para as estações de qualidade do ar da Chamusca, Lourinhã, Fernando Pó e Sra. do Minho para o ano de 2010

Analisando a Figura 4.11, para a estação da Lourinhã, o modelo apresenta uma boa concordância para os meses em que é esperado que os valores médios das concentrações sejam mais baixos e possuam um comportamento aproximadamente constante. Este comportamento espera-se para os meses de Verão e de facto as menores diferenças entre os valores estimados e os medidos foram obtidas para os meses de Julho, que verificou a melhor concordância de valores, Agosto e Setembro. Para os meses de Inverno, em que as concentrações não são tão lineares e assumem valores mais elevados, a diferença é bem mais significativa como demonstra o gráfico para os meses de Novembro, Dezembro e Janeiro. Neste caso o modelo subestima as concentrações de NO₂. No caso da estação da Chamusca pode afirmar-se que existe uma concordância baixa entre os valores medidos e os estimados pelo modelo. As melhores aproximações foram alcançadas para os meses de Janeiro, Fevereiro, Março, Outubro e Dezembro. Para a Chamusca, as piores correlações foram obtidas para os meses de Verão. Para a estação de Fernando Pó a aproximação entre os valores estimados e os medidos por esta estação piora consideravelmente. Apenas existe uma relação próxima entre os valores verificados para os meses de Dezembro e Janeiro. No que respeita à estação da Senhora do Minho esta estação sofreu danos devido a um incêndio que ocorreu em Agosto de 2010 e só voltou a ser ativada em Abril de 2011, pelo que não existem dados para comparação entre os meses de Setembro a Dezembro (CCDRN, 2011). A estação da Senhora do Minho é a estação que revela pior desempenho do modelo de regressão. Denota-se claramente que para os meses onde é possível fazer a comparação dos valores medidos e os estimados o modelo sobrestima os valores de concentração para esta estação.

Apesar do modelo refletir para alguns meses uma concordância, na maior parte deles não se verifica uma boa aproximação entre os valores medidos e os estimados. Na tentativa de perceber quão afastados se encontram os valores estimados, calculou-se, para cada estação, um valor médio que traduz as diferenças entre os valores de cada mês estimados e medidos. Baseado nesta abordagem, as diferenças obtidas entre os dados medidos nas estações e dados estimados a partir de dados de satélite correspondem em média a 53%.

5 CONCLUSÃO

A preocupação nacional para com a gestão da qualidade do ar e seus efeitos na saúde humana, ocupou um lugar de destaque, nas últimas décadas, muito devido às exigências da Comissão Europeia para com Portugal como Estado Membro. Portugal obrigou-se a adaptar a sua legislação às normas comunitárias existentes e por conseguinte implementar ações e medidas e realizar estudos e avaliações sobre o panorama de poluição nacional. O uso de dados de deteção remota através de satélite em estudos de qualidade do ar é uma área pouco explorada. Apesar de já existirem estudos semelhantes a este um pouco por todo mundo, em Portugal, esta é uma área ainda pouco desenvolvida, desconhecendo-se a existência de outros estudos e como tal não foi possível a comparação dos resultados obtidos com outros estudados efetuados em território nacional.

Neste sentido, o trabalho foi desenvolvido com o principal objetivo de efetuar um estudo sobre a variação da composição da baixa troposfera recorrendo a dados de satélite. Para tal, recorreu-se à análise de dados de monitorização da qualidade do ar fornecidos pelas estações rurais de fundo que integram a rede nacional de monitorização para o poluente atmosférico NO₂ durante o ano de 2009. O estudo foi iniciado com a análise sobre a taxa de recolha mínima imposta pela legislação, de onde das 11 estações em estudo se apuraram 9, resultando na eliminação, nesta fase, das estações de Montemor-o-Velho e Lamas de Olo por incumprimento deste requisito. A análise destes dados incluiu a observação do perfil médio horário do poluente para todas as estações em estudo e desta resultou que todas as estações apresentavam um perfil muito semelhante e coerente com o comportamento esperado para estações rurais de fundo, excetuando as estações da Senhora do Minho e de Fornelo do Monte que não apresentaram um comportamento tão evidente. A comprovar o ciclo diário de formação e consumo de NO₂, todas as estações apresentaram dois máximos de concentração relativamente coincidentes durante o dia. O primeiro observou-se no período da manhã e o segundo ao final da tarde, respetivamente das 8:00 horas às 10:00 horas e das 19:00 horas às 21:00 horas. No entanto, denotou-se que algumas estações apesar de apresentarem comportamento rural de fundo apresentaram desvios ao intervalo de horas mencionado. No caso da estação de Fernando pó e Fundão, o pico da manhã obteve-se às 6:00 horas. Para as estações que exibiram comportamentos mais atípicos, Fornelo do Monte e Senhora do Minho, a primeira delas atingiu o 2º pico de concentração entre as 17:00

horas e as 18:00 horas e a 2ª estação referida apresentou um ligeiro aumento da concentração entre as 10:00 horas e as 13:00 horas seguido de um período de fraca variação nos valores até às 19:00 horas. Os valores mais baixos foram registados entre as 11:30 horas e as 15:30 horas coincidindo com o período do dia em que a radiação solar é mais intensa e os óxidos de azoto são consumidos para dar origem à formação de ozono. No geral, pode afirmar-se que as estações vão de encontro à classificação que lhes foi atribuída, a de estações rurais de fundo.

Com o propósito de analisar o cumprimento dos requisitos legais, foi levada a cabo uma análise de excedências da qual se concluiu que para o período e poluente em estudo, nenhuma das estações analisadas registou valores acima dos estipulados por lei, podendo afirmar-se a não verificação de excedências.

A segunda fase do estudo centrou-se na aquisição dos dados de satélite e na análise integrada destes dados com os dados medidos pelas estações de monitorização da qualidade do ar. A utilização de dados de satélite revelou-se de elevada importância para o estudo e poderá revelar-se crucial em estudos futuros de qualidade do ar. As observações de satélite permitem obter valores mais precisos quando comparados com outras formas de aquisição remota de dados usualmente utilizadas neste tipo de estudos, como sendo a utilização de aeronaves. Além das inúmeras vantagens do uso deste tipo de tecnologia, o OMI permite a distinção entre o NO₂ troposférico e o estratosférico, facto que se revelou muito útil uma vez que se pretendia estudar, entre outros objetivos, a variação da composição da baixa troposfera. Outro aspeto que se revelou importante para o desenvolvimento do trabalho, foi o facto de o satélite fornecer valores que representam valores médios obtidos para um campo de visão específico e abrangente. Isto significa que relativamente a metodologias que façam as suas medições em locais específicos e pontuais, os seus valores estão menos influenciados pelas adversidades meteorológicas, como sejam os ventos de superfície e por isso podem tornar-se mais representativos. Apesar de o valor de correlação obtido ser baixo, é possível estabelecer uma comparação entre os dados medidos pelo satélite e os valores de concentração obtidos pelas estações de monitorização da qualidade do ar. Prova disso é, por exemplo, na análise de tendências feita ao poluente ao longo do ano de 2009 onde se percebe claramente que os valores, genericamente, seguem o mesmo perfil.

Assim, recorreu-se à representação temporal dos dados, separadamente, obtendo-se uma reta de regressão para cada estação. Numa primeira análise, pode concluir-se que na generalidade das estações o valor de R é baixo e com base neste facto foram

excluídas do estudo as estações que apresentavam valores de R próximos de zero, designadamente a estação do Fundão e de Monte Velho. Celarier et al., (2008) explicam a obtenção destes valores de R baixos pela heterogeneidade espacial característica dos constituintes do ar emitidos por fontes, muitas vezes em movimento, e sujeitas a ventos de superfície, implicando que um único ponto de medição (isolado ou pontual), muitas vezes possa não ser representativo quando relacionado com uma medição feita por satélite que através do seu campo de visão pode visualizar regiões de centenas de km².

Com o objetivo de estimar as concentrações de NO₂ e obter a sua representação espacial, a reta de regressão linear foi obtida com base nas estações que apresentavam melhor correlação entre os valores. Desta forma, conseguiu-se apurar um valor de R = 0,57 que apesar de não revelar uma correlação ótima, se enquadra numa correlação satisfatória e da mesma grandeza quando comparada com estudos similares.

Foi também possível, neste estudo, inferir sobre a sazonalidade e variabilidade espacial dos dados através das representações espaciais das médias mensais estimadas através da reta de regressão. Estas representações permitiram concluir que o padrão resultante da estimativa efetuada é o esperado para o poluente em questão. Os valores mais elevados concentram-se nas zonas de maior densidade populacional, zonas industrializadas e principais vias de tráfego. Necessariamente os valores mais altos de concentração foram obtidos nas zonas de Lisboa, Península de Setúbal, Porto e área circundante.

Concluindo relativamente à análise quantitativa desta estimativa, apurou-se que os resultados obtidos vão de encontro ao esperado. É possível avaliar a variação sazonal dos valores integrando estas duas técnicas. Estudos efetuados garantem que a partir de medições de NO₂ à superfície, a longo prazo, pelas estações de monitorização da qualidade do ar, é possível obter dados de validação preciosos que permitem validar as variações diurnas, semanais e sazonais observadas a partir do espaço (Boersma, *et al.*, 2009). Os meses de Novembro, Dezembro e Janeiro apresentaram os valores médios e de percentil 75 mais elevados, refletindo a maior variabilidade espacial no Inverno típica do NO₂ e do seu tempo de vida na atmosfera. Os meses de Junho, Julho e Agosto apresentam concentrações médias mais baixas e menor variabilidade espacial possivelmente devido a importância de processos fotoquímicos durante os meses mais quentes do ano, como também eventualmente devido a redução de emissões durante este período. São meses que exibem temperaturas mais elevadas e por conseguinte levam à diminuição do consumo de combustíveis fósseis e madeiras que servem os

sistemas de aquecimento. É importante referir que nos meses de Verão o tempo de vida dos óxidos de azoto é mais baixo devido aos processos de remoção pelas reações fotoquímicas provocadas pela intensidade da radiação solar.

Por forma a verificar a aplicabilidade do modelo estimaram-se, através da reta de regressão linear, concentrações de NO₂ para o ano de 2010 para as 4 estações usadas no cálculo da reta, e compararam-se com os medidos pelas estações nesse mesmo ano. Os resultados obtidos permitem expressar que a estação que obteve maior concordância de valores foi a estação da Lourinhã, estação que obteve o valor mais elevado de R. Esta concordância foi mais expressiva nos meses onde a variabilidade dos dados é menor, ou seja, nos meses de Julho, Agosto e Setembro. No caso dos meses de Inverno, o modelo subestima as concentrações de NO₂. Para a estação da Chamusca concluiu-se que existe uma concordância baixa entre os valores medidos e os estimados, sendo que as piores correlações foram obtidas para os meses de Verão. O mesmo se pode deduzir relativamente à estação de Fernando Pó onde se obteve apenas uma relação próxima entre os valores estimados e os medidos. Por fim, analisando a estação da Senhora do Minho, esta apresentou o pior desempenho do modelo. Para os meses onde foi possível comparar os dados, denota-se que o modelo sobrestima os valores de concentração para esta estação.

Na base de resultados menos satisfatórios, obtidos neste estudo, podem estar envolvidos fatores como os descritos num estudo realizado por Russel em 2012. O OMI tem vindo a fornecer observações úteis durante mais de 7 anos apesar de o seu tempo útil definido para a missão ser de apenas 5 anos (Levelt et al., 2006a). Ao longo do seu desempenho, os seus detetores têm-se degradado resultando num menor desempenho do espectrómetro para a obtenção de dados. Desde o início do ano de 2009 que se desenvolveram várias anomalias de linha que afetaram perto de metade das observações recolhidas.

Relativamente a trabalhos futuros torna-se importante e essencial desenvolver de forma mais aprofundada a avaliação da qualidade do ar integrando estas duas técnicas de medição. Deverá ser feito um estudo mais amplo e abrangente onde se incluam mais poluentes atmosféricos, a diferentes escalas e para todas as tipologias de estações existentes. Sugere-se ainda que se alargue a série de dados de forma a analisar e perceber com mais detalhe a tendência seguida pelo poluente durante um período de estudo mais vasto, assim como estender a análise a uma área de estudo maior. Por outro lado, combinar os dados obtidos com diferentes sensores poderia melhorar a qualidade

dos dados obtidos. Esta simbiose revela elevada importância em áreas como a deteção de eventos, o transporte de poluição, a predição de modelos, a estimativa de emissões e a elaboração de medidas e políticas que atendam às necessidades da prevenção da saúde e dos efeitos nefastos causados pela poluição atmosférica.

Referências bibliográficas

Ahmad, S.; Bhartia, P.; Hilsenrath, E.; Leppelmeier, G.; Levelt, P. e Johnson, J. (2003). *Atmospheric products from the ozone monitoring instrument (OMI)*. Acedido em: 05 de Maio de 2013, em: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/> .

APA (2010). *Manual de métodos e de procedimentos operativos das redes de monitorização de qualidade do ar: Amostragem e análise*. Agência Portuguesa do Ambiente, Amadora.

APA (2011). *Emissão de poluentes atmosféricos por concelho, 2009*. Agência Portuguesa do Ambiente, Amadora.

Aggarwall, S. (2004). *Principles of remote sensing*, in Sivakumar, M.V.K.; Hinsman, D.E. *Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology*. Agricultural Meteorology Division and Satellite Activities Office, World Meteorological Organization, Switzerland.

Arya, S.P. (1999). *Air pollution meteorology and dispersion*. Oxford University Press, Inc, New York.

Bastos, P. (2010). *A transformação de um território/zona de conflito e as inerentes preocupações ambientais, de qualidade de vida e sustentabilidade: O caso da cidade de Estarreja*. Dissertação apresentada à Universidade de Coimbra para a obtenção do Grau de Mestre em Geografia Física, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Bardr, O. e Probert, S.D. (1993). Oxides of nitrogen in the earth's atmosphere: Trends, sources, sinks and environmental impacts. *Applied Energy*. **46**:1-67.

Borrego, C. e Miranda, A.J. (2008). *Avaliação da qualidade do ar da região norte: Uma perspectiva histórica, 2000-2007*. Universidade de Aveiro, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento da região Norte, Porto.

Blackweel, W.J. e Chen, F.W. (2009). *Neural network in atmospheric remote sensing*. Massachusetts Institute of Technology, USA.

Borrego, C.; Ribeiro, C.; Coutinho, M. e Bento, S. (2006). *Avaliação de impactes na qualidade do ar: Escalas de aplicação*. Instituto do Ambiente e Desenvolvimento. Universidade de Aveiro, Aveiro.

Boersma, K.F.; Jacob, D.J.; Trainic, M.; Rudich, Y.; DeSmedt, I.; Dirksen, R. e Eskes, H.J. (2009). Validations of urban NO₂ concentrations and their diurnal and sasonal variations observed from the SCIAMACHY and OMI sensors using in situ surface measurements in Israeli cities. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **9**: 3867-3879.

Borrows, J.P.; Goede, A.P.H.; Muller, C. e Bovensmann, H. *Sciamachy: The need for atmospheric research from space* in Gottwald, M. e Bovensmann, H. (2011). *Sciamachy: Exploring the changing earth's atmosphere*. Springer, p. 11-22.

Bower, J.S.; Broughton, G.F.J.; Stedman, J.R. e Williams, M.L. (1994). A winter NO₂ smog in the UK. *Atmospheric Environmental*, **283**: 461-475.

Brasseur, G.P. e Solomon, S. (1986). *Aeronomy of the middle atmosphere*. Second edition, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.

Brasseur, G.P.; Orlando, J.J. e Tyndall, G.S. (1999). *Atmospheric chemistry and the global change*. Oxford University Press, New York.

Brown, S.S.; Dibb, J.E.; Stark, H.; Aldener, M.; Vozella, M.; Whitlow, S.; Williams, E.J.; Lerner, B.M.; Jakoubek, R.; Middlebrook, A.M.; DeGouw, J.A.; Warneke, C.; Goldan, P. D.; Kuster, W. C.; Angevine, W.M.; Sueper, D.T.; Quinn, P.K.; Bates, T.S.; Meagher, J.F.; Fehsenfeld, F.C. e Ravishankara, A.R. (2004). Nighttime removal of NO_x in the summer marine boundary layer. *Geophysical Research Letters*, **31**, L07108, doi: 10.1029/2004 GL019412.

Brunner, D.; Staehelin, J.; Jeker, D.; Wernli, H. e Schumann, U. (2001). Nitrogen oxides and ozone in the tropopause region of the northern hemisphere: Measurements from commercial aircraft in 1995/1996 and 1997. *Journal of Geophysical Research*, **106**: 27,673 – 27,699.

Burrows, J.P.; Platt, U. e Borrel, P. (2011). *The Remote Sensing of Tropospheric Composition from Space*. Springer Verlag, Heidelberg.

Bucsela, J.E.; Celarier, E.A.; Wenig, M.O.; Gleason, J.F.; Veefkind, J.P.; Boersma, K.F. e Brinksma, E.J. (2006). Algorithm for NO₂ vertical column retrieval from the ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44**: 1245-1258.

CCDRalg (2004). *Qualidade do ar na região do Algarve 2004*. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve, Divisão de Monitorização Ambiental.

CCDRN (2009). *Avaliação da qualidade do ar na região norte, em 2009*. Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte, Porto.

CCDRN (2011). *Relatório de análise estatística dos dados de qualidade do ar, da região norte, em 2011*. Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte, Porto.

Celarier, E.A.; Brinksma, E.J.; Gleason, J.F.; Veefkind, J.P.; Cede, A.; herman, J.R.; Ionov, D.; Goutail, F.; Pommereua, J.-P.; Lambert, J.-C.; Roozendael, M.; Pinardi, G.; Wittrock, F.; Schönhardt, A.; Richter, A.; Ibraim, O.W.; Wagner, T.; Bojkov, B.; Mount, G.; spinei, E.; Chen, C.M.; pougetti, T.-J.; Sander, S.P.; Bucsela, E.J., Wenig, M.O.; Swart, D.P.J.; Volten, H.; Kroon, M. e Levelt, P.F. (2008). Validation of ozone monitoring instrument nitrogen dioxide columns. *Journal of Geophysical Research*, **113**, D15S15, doi:10.1029/2007JD008908.

Chapman, J. B. (1987). Introduction to remote sensing. *The Guilford Press*, New York.

Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. Segunda edição, Ediciones Rialp, S.A., Madrid, 224 pp.

Comissão Europeia (1997). *Position paper on air quality: Nitrogen dioxide*. Working Group of Nitrogen Dioxide.

Coutinho, M. (1995). *As Circulações atmosféricas de mesoscala na costa portuguesa – Aplicação da teoria transiente de turbulência*. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para a obtenção do Grau de Doutor em Ciências Aplicadas ao Ambiente, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Dentener, F.J. e Crutzen, P.J. (1993). Reaction of N_2O_5 on tropospheric aerosols: Impact on the global distributions of NO_x , O_3 and OH. *Journal of Geophysical Research*, **98**: 7149-7163.

DGA (2010). *Campanhas para a avaliação preliminar da qualidade do ar em Portugal – NO_2 e SO_2 – Tubos de difusão*. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente e Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território, Direção Geral do Ambiente, Alfragide.

DGA (2001). *Campanha de avaliação das concentrações de dióxido de azoto e dióxido de enxofre no ar ambiente em Portugal*. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente e Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território, Direção Geral do Ambiente, Alfragide.

Elachi, C. e Zyl, J.V. (2006). *Introduction of the physics and techniques of remote sensing*. Second edition, John Wiley & Sons, Inc, USA.

Esteves, T. (2004). *Base de dados do potencial energético do vento em Portugal – Metodologia e desenvolvimento*. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências e Engenharia da Terra, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.

Feliciano, M.J. (2000). *Deposição seca de poluentes gasosos em ecossistemas do sul da europa: Medição e parametrização*. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para a obtenção do Grau de Doutor em Ciências aplicadas ao Ambiente, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Ferreira, F.; Mesquita, S.; Tente, H.; Torres, P.; Santos, E.; Carreira, P.; Jardim, D. e Esgalho, F. (2002). *Avaliação preliminar da qualidade do ar em Portugal – SO_2 , NO_2 , NO_x , PM_{10} e Pb*. Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território, Instituto do Ambiente.

Figueiredo, M.L. (2011). *Contributo para a gestão da qualidade do ar em Estarreja*. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Finlayson-Pitts, B.J. e Pitts, J.N.Jr. (1986). *Atmospheric chemistry: Fundamentals and experimental techniques*. John Wiley & Sons, New York.

Finlayson-Pitts, B.J. e Pitts, J.N.Jr. (2000). *Chemistry of the upper and lower atmosphere: Theory, experiments, and applications*. Academic Press, San Diego (CA).

Garcia, M.L.; Evora, J.A. e Pérez, A.M. (2012). *Satélites de teledetección para la gestion del territorio*. Consejería de Agricultura, Granaderia, pesca y Aguas del Gobierno de Canarias, Canarias.

Gonçalves, L.P (2008). *Impacte da combustão doméstica na qualidade do ar*. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Harder, J.W.; Brault, J.W.; Johnston, P.V. e Mount, G.H. (1997). Temperature dependent NO₂ cross sections at high spectral resolution. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, **102**: 3861-3879.

IGP (2005). *Atlas de Portugal*. Instituto Geográfico Português, Lisboa.

INE (2010). *Estatísticas do Ambiente 2010*. Instituto Nacional de estatística, Lisboa.

INE (2011). *XV Recenseamento Geral da População – 2011*. Instituto Nacional de Estatística, Lisboa.

Kramm, G.; Dlugi, R., Dollard, G.J.; Foken, T.; Molders, N.; Muller, H.; Seiler, W. e Sievering, H. (1995). On the dry deposition of ozone and reactive nitrogen species, *Atmospheric Environment*, **29**: 3209-3231.

Kroon, M.; Haan, J.F.; Veefjind, J.P.; Froidevaux, L.; Wang, R.; Kivir, R.; Hakkarainen, J.J. (2011). Validation of operational ozone profiles from the ozone monitoring instrument. *Journal of Geophysical Research*, **116**, D18305, doi: 10.1029/2010JD015100.

Levelt, P.F.; van der Oord, G.H.J.; Dobber, M.R.; Mälkki, A.; Visser, H., Vries, J.; Stammes, P.; Lundell, J.O.V. e Saari, H. (2006a). The ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44**: 1093-1101.

Levelt, P.F., Hilsenrath, E.; Leppelmeier, G.W.; van der Oord, G.H.J.; Bhartia, P.K., Tamminen, J.; Haan, J.J. e Veefkind, J.P. (2006b). Science objectives of the ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44**: 1199-1208.

- Levin, N. (1999). *Fundamentals of remote sensing*, Remote Sensing Laboratory, Geography Department, Tel Aviv University, Israel.
- Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W. e Chipman, J.W. (2008). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Sith edition, John Wiley & Sons, Inc, USA.
- Martin, R.V. (2008). Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmospheric Environment*, **42**: 7823-7843.
- Mather, P.M. (2006). *Computer processing of remotely sensed images. An introduction*. John Wiley & Sons, Ltda, West Sussex, 324 pp.
- Maini, A.K. e Agrawal, V. (2011). *Satellite technology: Principles and applications*. Second edition, John Wiley and Sons, United Kingdom.
- Meneses, P.R. e Almeida, T. (2012). *Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto*, Brasília.
- Mérrienne, M.F; Coquart, B. e Jenouvier, A. (1995). The NO₂ absorption apectrum I: Absorption cross-sections at ambiente temperature in the 300-500 nm region. *Journal of Amospheric Chemistry* **20**: 281-297.
- Mesquita, S.M.P. (2009). *Modelação da distribuição espacial da qualidade do ar em Lisboa usando sistema de informação geográfica*. Dissertação apresentada ao Instituto superior de Estatística e Gestão da Universidade Nova de Lisboa para a obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Sistemas de Informação Geográfica, Universidade Nova de Lisboa, lisboa.
- Miranda, P.M.A.; Coelho, F.E.S.; Tomé, A.R.; Valente, M.A.; Carvalho, A.; Pires, C.; Pires, H.O.; Pires, V.C. e Ramalho, C. (2002). *20th Century portuguese climate and climate scenarios*, in Santos, F.D.; Forbes, K., e Moita, R. (eds), 2002, *Climate change in Portugal: Scenarios, impacts and adaptation measures (SIAM Project)*, 23-83, Gradiva, 454 pp.

Monteiro, E. (2012). *Impacto da crise económica nas emissões atmosféricas industriais*. Relatório de Estágio Curricular apresentado à Universidade de Aveiro para a obtenção de Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Monteiro, A. (2007). *Desenvolvimento de um sistema de avaliação e precisão da qualidade do ar em Portugal*. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para a obtenção de Grau de Doutor em Ciências Aplicadas ao Ambiente, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Peixoto, J.P. (1981). *A Radiação Solar e o Ambiente*, Comissão Nacional do ambiente, Lisboa.

Platt, U. (1994). Differential optical absorption spectroscopy (DOAS), in air monitoring by spectroscopic techniques. *Chemical Analysis Series*, Siegrist, M.W. (ed.), Wiley, New York, **127**: 27-84.

Prados, A.I.; Leptoukh, G.; Lynnes, J.J.; Rui, H.; Husar, A. e Chen, R.B. (2010). Access, visualization, and interoperability of air quality remote sensing data sets via the giovanni online tool. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **3**: 359-370.

Prior, V. (2006). *Estrutura termodinâmica da baixa troposfera associada ao regime de brisas em Portugal*. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para a obtenção do Grau de Doutor em Física, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Ribeiro, O. (1987). *Portugal, o mediterrâneo e o atlântico*. 5ª Edição. Lisboa: Livraria Sá da Costa editora.

Ribeiro, O.; Daveau, S. e Lautensach, H. (1991). *Geografia de Portugal I: A posição geográfica e o território*. Lisboa: João Sá da Costa.

Richards, J.A. e Jia, X. (2006). *Remote sensing digital image analysis. An introduction*. Springer, New York, 439 pp.

Ridley, B.A.; Walega, J.G.; Dye, J.E. e Grahek, F.E. (1994). Distributions of NO, NO_x, NO_y, and O₃ to 12 km altitude during the summer monsoon season over New Mexico. *Journal Geophysics Research*, **99**: 25519-25534.

Russel, A.R. (2012). *Spaced-based observations of NO₂: Trends in anthropogenic emissions*. A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Chemistry in the Graduate Division of the University of California, Berkeley.

Salinero, E.C. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la terra desde el espácio*. 3ª Edição, Ariel, S.A., Barcelona.

Sabins, F.F. (1997). *Remote sensing – Principles and interpretation*. Third edition, Waverland Press Inc, Illinois.

Salmim, L.I.F. (2005). *Avaliação da qualidade do ar: Aplicação a cenários de emissões*. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para a obtenção do Grau de Mestre em Poluição Atmosférica, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Schneider, W.; Moortgat G.K.; Burrows, J.P. e Tyndall, G.S. (1987). Absorption crosssections of NO₂ in the UV and visible region (200 - 700 nm) at 298 K. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, **40**: 195-217.

Seinfeld, J.H. (1986). *Atmospheric chemistry and physics of air pollution*. Wiley – Interscience, New York.

Seinfeld, J.H. e Pandis, S.N. (1998). *Atmospheric chemistry and fhisics: From air pollution to climate change*, Jonh Wiley & Sons, New York.

Shaub, D. (2006). *Tropospheric nitrogen dioxide from GOME and SCIAMACHY measurements over the alpine region: Strengths and limitations*. A dissertation submitted to the Swiss Federal Institute of Technology Zurich for the degree of Doctor of Sciences.

Shoeberl, M.R.; Douglass, A.R.; Hilsenrath, E.; Bhartia, P.K.; Beer, R.; Waters, J.W., Gunson, M.R., Froidevaux, L., Gille, J.C.; Barnett, J.J.; Levelt, P.F. e DeCola, P. (2006). Overview of the EOS aura mission. *IEEE Transactions Of Geoscience and Remote Sensing*, **40**: 1066-1074.

Spicer, C.W. (1982). Nitrogen oxide reactions in the urban plume of Boston. *Science*, **215**: 1095-1097.

Stephens, G.L. (1994). Remote sensing of the lower atmosphere. *Oxford University Press*, New York.

Warneck, P. (2000). *Chemistry of the natural atmosphere*. Second edition, Academic Press, London.

Yuval, D.Y. e Broday, D. (2007). Allocation of routinely monitored mixing ratio of nitrogen oxides of their sources. *Environmental Science and Technology*, **40**: 7215-7221.

Sítios consultados na internet (de Outubro de 2012 a Setembro de 2013):

URL1: http://www.esa.int/Specials/Eduspace_EN/SEM7YN6XIG_0.html

URL2: www.earth-nasa.gov

URL3: <http://atrain.nasa.gov/publications/Aura.pdf>

URL4: http://jpl.nasa.gov/news/press_kits/aura_presskit.pdf

URL5: http://disc.sci.gsfc.gov/Aura/additional/documentation/readme.OMI_Dug.pdf

URL6: <http://www.qualar.org/INDEX.PHP?page=6&subpage=>

URL7: <http://www.nrcan.gc.ca>

Anexo A – Análise de Correlação

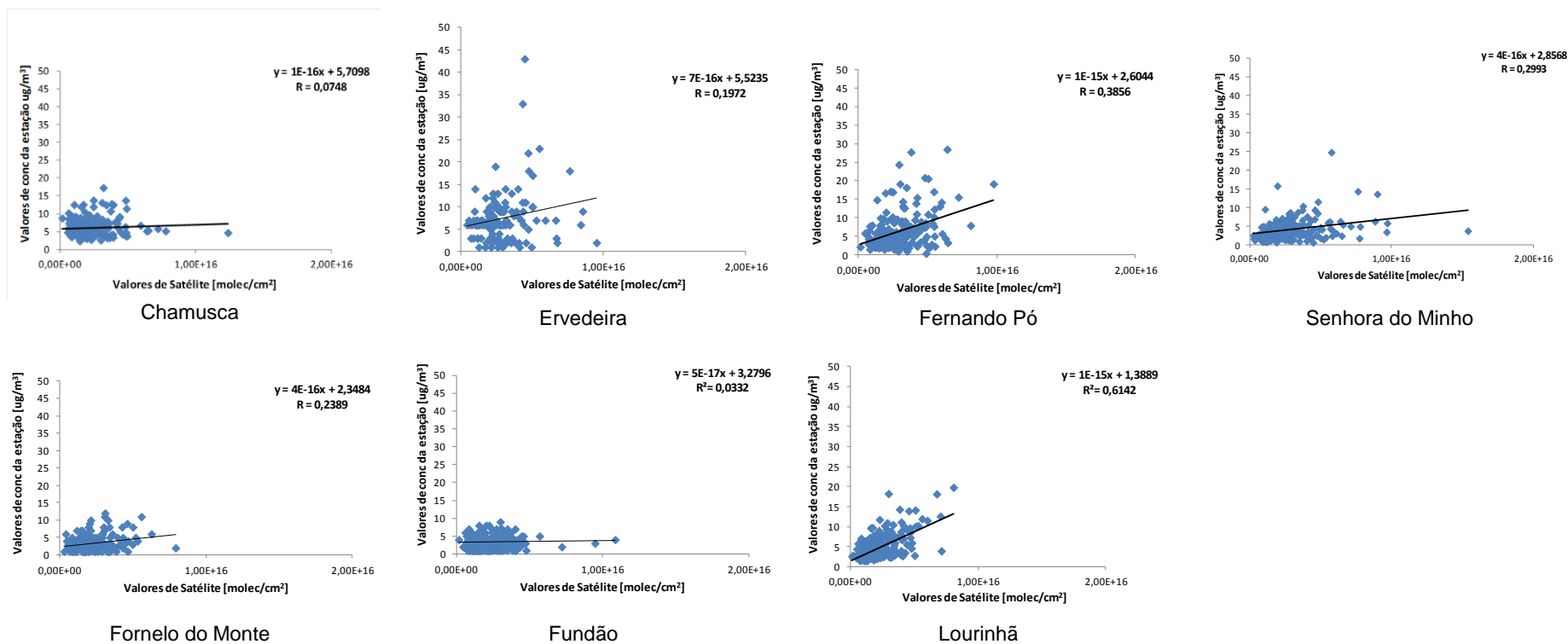


Figura A.1 – Representação resultante da análise de correlação efetuada entre os dados medidos pelo satélite e os medidos pelas estações de monitorização da qualidade rurais de fundo, para o NO₂, e no ano de 2009